



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

KONSTRUKCE A VÝROBA MODELÁŘSKÉ CNC FRÉZKY

CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF MODELLER CNC MILLING MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miloš Krejčí

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Miloš Krejčí**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce a výroba modelářské CNC frézky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a následná výroba modelářské CNC frézky. Určenou primárně pro obrábění plošných dřevěných a plastových dílů s předpokládanými rozměry 400 x 300 x 100 mm. Součástí práce bude i technické posouzení přesnosti daného zařízení případně doporučení do budoucna.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše zvolené problematiky
- návrh CNC frézky
- výroba a montáž CNC frézky
- ověření funkčnosti frézky
- technicko ekonomické zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

MOAVENI, S. Finite element analysis: theory and application with ANSYS. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008. xv, 861 s. Pearson education international. ISBN 978-0-13-241651-1.

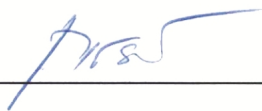
ŽENÍŠEK, J. a M. JENKUT. Výrobní stroje a zařízení. Praha: SNTL, 1990. 276 s. ISBN 04 - 222 - 90.

VILÍMEK, D. Portálová frézka: Portal Milling Machine. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD].

BRYCHTA, J. Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3522-8.

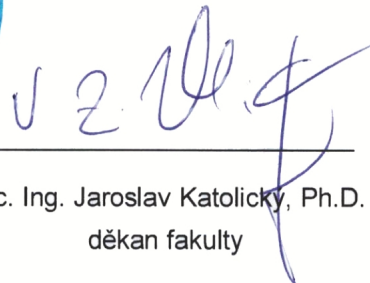
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 25. 9. 2018



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu





doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je návrh a výroba modelářské CNC frézky. Práce zahrnuje seznámení s modelářskými CNC frézami dostupnými na trhu, jejich porovnání a poté vlastní návrh konstrukce modelářské CNC frézky, následovaný výrobou prototypu a jeho testováním. Návrh zahrnuje výpočtové stanovení a experimentální ověření parametrů krokových motorů, dimenzování rámu, simulaci zatížení a výběr vhodných komponentů řídicí elektroniky. Prototyp vyroben za účelem ověření koncepce, výrobních technologií a nákladů.

Klíčová slova

modelářská CNC frézka, stolní CNC frézka, CNC router, návrh konstrukce stroje, výroba CNC frézky

ABSTRACT

The purpose of this bachelor thesis is to design and manufacture a modeller CNC milling machine. The work includes introduction of modeller CNC milling machines available on the market and their comparison. The thesis also contains custom design of modeller CNC milling machine, followed by prototype manufacturing and testing. The design includes calculation and experimental verification of stepper motor parameters, frame sizing, load simulation and selection of suitable control electronics. A prototype was designed to verify concept, manufacturing technologies and cost.

Key words

modeller CNC milling machine, desktop CNC milling machine, machine design, CNC router, manufacturing of CNC milling machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍ, Miloš. *Konstrukce a výroba modelářské CNC frézky*. Brno 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 67 s. 23 příloh. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Konstrukce a výroba modelářské CNC frézky** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Miloš Krejčí

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu, panu Ing. Oskaru Zemčikovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady a odborné vedení, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

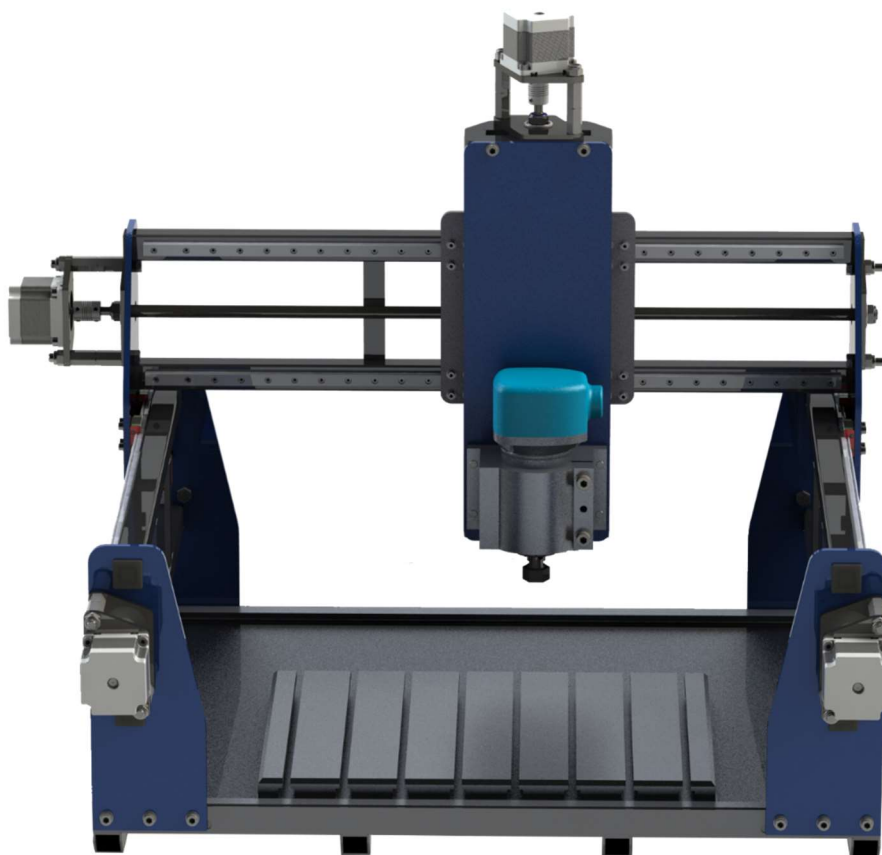
Abstrakt	5
Prohlášení	7
Poděkování	9
Obsah.....	11
Úvod.....	13
1 Konstrukce CNC frézek.....	14
1.1 Stolní CNC frézky.....	14
2 Stolní CNC frézky dostupné na trhu.....	16
3 Návrh stroje.....	27
3.1 Požadavky na navrhovaný stroj	27
3.2 Koncepce stroje	27
3.3 Konstrukce rámu	27
3.3.1 Volba profilů pro rám.....	29
3.3.2 Díly vypálené z ocelového plechu	30
3.4 Lineární vedení	31
3.5 Převod krouticího momentu	34
3.5.1 Porovnání předepjaté a nepředepjaté matice.....	35
4 Návrh řízení	37
4.1 Volba řídicí elektroniky	38
4.2 Volba krokových motorů.....	39
4.3 Grbl firmware specifikace	43
4.4 Kompatibilní software	44
5 Ověření funkčnosti frézky.....	46
5.1 Experimentální měření opakovatelnosti stroje.....	48
6 Technicko – ekonomické zhodnocení	51
6.1 Technické zhodnocení	51
6.1.1 Návrhy na vylepšení.....	53
6.2 Ekonomické zhodnocení	53
7 Závěr.....	56
Seznam použitých zdrojů	57
Seznam použitých symbolů a zkratk	63
Seznam příloh	67

ÚVOD

Počítačem řízené obráběcí stroje jsou využívány ve všech výrobních odvětvích. Pro výrobu součástí o rozměrech v řádu milimetrů, až po metry, pro rotační i nerotační součásti. Tomu ovšem musí odpovídat konstrukce daného stroje. Řízení obráběcích strojů pomocí počítače pomáhá dosahovat vyšší přesnosti, spolehlivosti, a především produktivity výroby.

CNC (Computer Numeric Control – číslicové řízení obráběcího stroje) lze aplikovat nejen na frézky a soustruhy, ale je použito také pro řízení brusek, souřadnicových vrtaček, plazmových a laserových vypalovacích strojů, strojů využívajících elektrický proud, nebo vodní paprsek pro odebrání materiálu. Mimo metody subtraktivní, kdy dochází k odebrání materiálu je velký rozmach použití aditivní metody, kdy je materiál přidáván. Metoda je označována jako 3D tisk a bez použití počítačového řízení by nebyla možná.

Cílem práce je zkonstruovat a vyrobit takový stroj – viz obr. 1, který by se uplatnil pro obrábění především dřevěných a plastových dílů z plošných polotovarů. Primárně určený pro modelářské a truhlářské účely, ale i pro výrobu dekorací a šperků. Parametrem udávajícím velikost stroje je zadaný obrobitelný prostor. Mimo to by mělo být možné hotový stroj umístit na stůl. Důležitým limitujícím požadavkem je dosažení nízké ceny vstupního materiálu. Při návrhu stroje bude také brán ohled na dostupné technologie potřebné pro následnou výrobu.



Obrázek 1 Vizualizace návrhu modelářské CNC frézky.

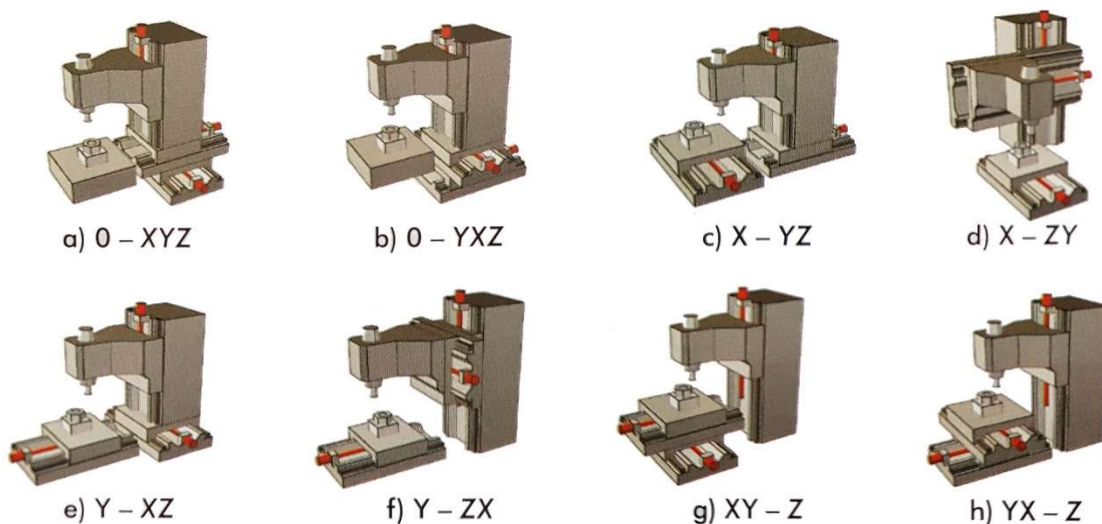
1 KONSTRUKCE CNC FRÉZEK

Obráběcí stroje se svislou osou vřetene se dělí podle počtu pohyblivých os v obrobku a ve vřetenu. V praxi je využíváno následujících 8 variant – viz obr. 2. Nejsou využívány kombinace s pohybem obrobku v ose Z [1].

Těchto 8 variant se skládá z následujících kombinací:

- posuv nástroje ve 3 osách
- posuv nástroje v 1 ose a obrobku ve 2 osách
- posuv obrobku v 1 ose a nástroje ve 2 osách

Rozložení os stroje je voleno na základě znalosti aplikace daného stroje. Důležitým faktorem je velikost a případně hmotnost polotvarů používaných pro obrábění. Obecně je vhodnější pro velké těžké obrobky volit konstrukci využívající umístění co nejvíce os do vřetene. Výhodou je v takovém případě stále známá a neměnná hmotnost pohybujících se částí stroje. Pro menší součásti je nejčastěji využito konstrukce se dvěma pohyblivými osami v obrobku a jednou ve vřeteni. Tak je docíleno vyšší tuhosti stroje i při velkém rozsahu v ose Z.



Obrázek 2 Varianty uspořádání os [1].

1.1 Stolní CNC frézky

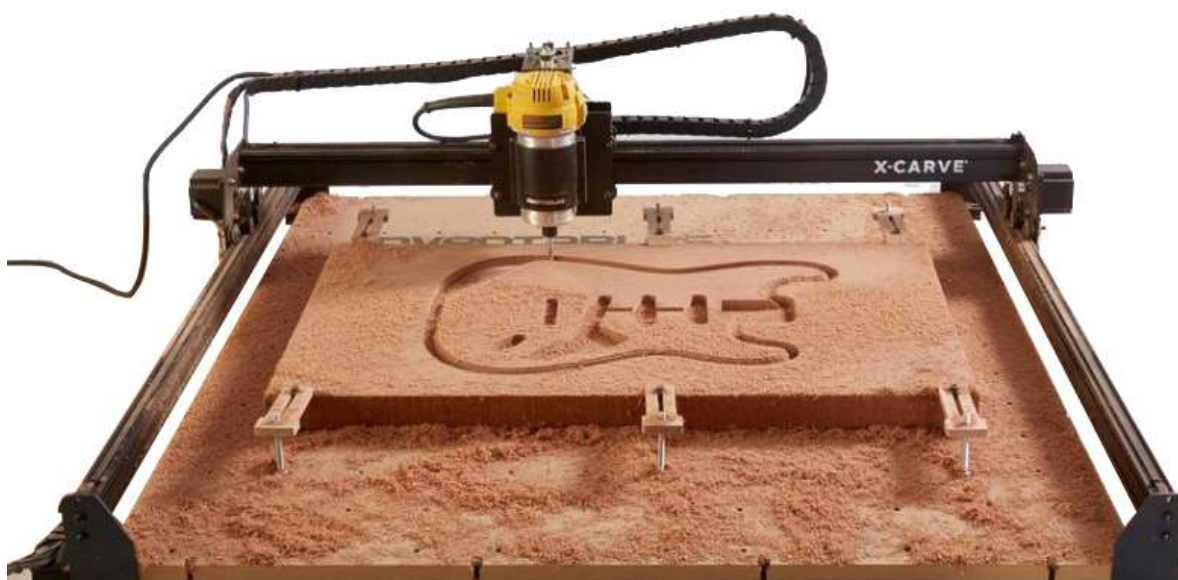
Stolní CNC frézky (v angličtině také často nazývané: „CNC router“) jsou určeny pro frézování, vrtání a gravírování dřeva, plastových materiálů, barevných kovů, vosku a desek tištěných spojů. Zde se s výhodou uplatní malé rozměry stroje, jednoduchá obsluha, malé nároky na údržbu a nízká pořizovací cena ve srovnání s konvenčními CNC frézkami. Využití nachází zejména v hobby dílnách, mezi modeláři a truhláři, v prototypových dílnách, ale i v malosériové výrobě předmětů s menšími požadavky na přesnost (např.: nábytek, hračky, dekorace, šperky, formy apod.).

Kvůli povaze konstrukce těchto strojů, většinou šroubovaných z hliníkových nebo ocelových profilů a plechů v kombinaci se zjednodušeným lineárním vedením, využívajícím namísto ocelových lineárních kolejnic a kuličkových vozíků jednoduché vodící profily, často s plastovými valivými prvky, je nedostatkem nízká tuhost rámu stroje a malá schopnost tlumit vibrace.

Také, kvůli lichoběžníkovým rovnoramenným šroubům nebo ozubeným řemenům, pro přenos krouticího momentu z krokových motorů bez zpětné vazby, je dosahováno menší přesnosti strojů.

Díky lehké konstrukci je však možno dosahovat vysokých posuvových rychlostí, kterých se s výhodou využívá například při gravírování komplexních 3D tvarů.

Pro konstrukci stolní CNC frézky, určené k frézování plošných obrobků – viz obr. 3, kde osy X a Y svým rozsahem značně převyšují osu Z, se z výčtu všech zmíněných v obr. 2 nejčastěji používá konstrukce využívající stojícího obrobku a vřetene pohybujícího se ve třech osách. V menším množství jsou používána i uspořádání s vřetenem pohybujícím se v ose X a Z a stolem pro upínání obrobku pohybujícím se v ose Y.



Obrázek 3 modelářská CNC frézka X – Carve [2].

2 STOLNÍ CNC FRÉZKY DOSTUPNÉ NA TRHU

Následuje výběr několika na trhu dostupných strojů označených jako stolní CNC frézky s parametry blízcími se řešenému zadání. Vybrané stroje jsou schopny obrábět současně ve třech osách, s výjimkou stroje, který disponuje 5 – ti osami a je schopen řídit všechny současně a stroje určeného pouze pro 2,5D obrábění.

a) Nomad 883 Pro

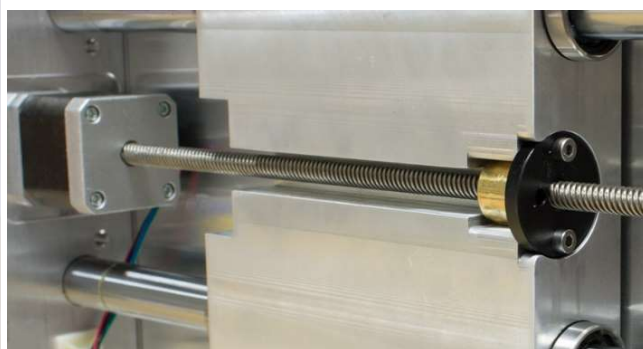
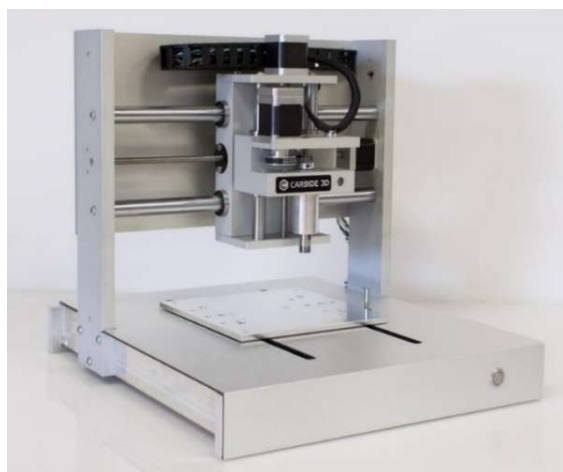
Parametry stroje vypsány v tabulce 1.

Tabulka 1 Parametry stroje Nomad 883 Pro [3].

Výrobce:	Carbide3D
Obrobitelný prostor (X, Y, Z):	203 x 203 x 76 mm
Půdorys (Š, D):	508 x 508 mm
Max. rychlost posuvu (X, Y, Z):	2500, 2500, 1250 mm.min ⁻¹
Přesnost stroje:	0,013 mm
Cena:	2 499 USD ± 57 000 Kč
Elektronika:	Nomad motion controller používající Grbl firmware*
Vřeteno:	BLDC motor, 70 W, 2 000 – 10 000 min ⁻¹
Přenos síly:	X, Y, Z – lichoběžníkové rovnoramenné šrouby s předepjatými maticemi
Lineární vedení:	X, Y – lineární kuličková ložiska a nepodepřené tyče Ø 20 Z – lineární kuličková ložiska a nepodepřené tyče Ø 16 mm
Krokové motory:	Nema 17 bez zpětné vazby
Rám:	šroubovaný z plných hliníkových profilů
Stůl:	Al + MDF

* Firmware = mikroprogramové vybavení ovládající danou elektronickou součást.

Stroj je vybaven automatickým měřením délky nástroje [3].



Obrázek 4 Rám stroje Nomad 883 Pro [3].

Přednostmi stroje Nomad 883 Pro jsou, v porovnání s ostatními stroji z výčtu, lineární vedení řešená pomocí silných kalených ocelových tyčí a lineárních kuličkových ložisek. Dále relativně tuhý rám šroubovaný z plných hliníkových profilů – viz obr. 3 vlevo a automatické měření délky nástroje.

Nevýhodami jsou především použití pouze 70W motoru včetně, malých krokových motorů pro pohony – viz obr. 3 vpravo a malý zdvih Z osy. Malý zdvih Z osy bude nedostatkem v případě upnutí delšího nástroje a umístění svěráku, kdy nezbyde prostor pro obrábění větších obrobků. Vzhledem ke zmíněným nedostatkům je cena odpovídající přibližně 57 000 Kč nepřiměřeně vysoká.

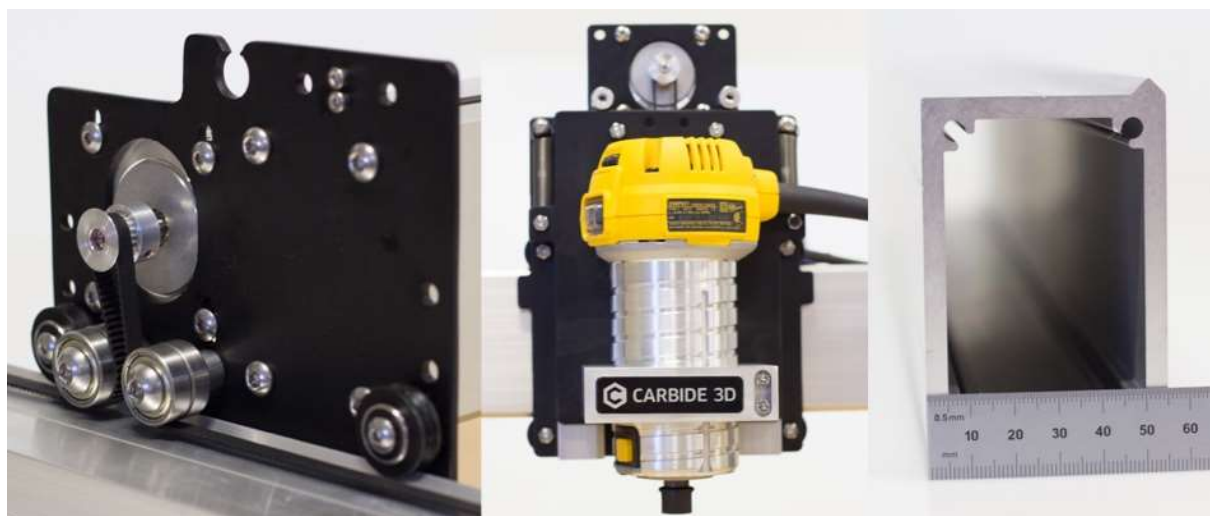
b) Shapeoko 3

Parametry stroje vypsány v tabulce 2.

Tabulka 2 Parametry stroje Shapeoko 3 [4].

Výrobce:	Carbide3D
Obrobitelný prostor (X, Y, Z):	Dodáváno jako stavebnice ve třech velikostech. 400 x 400 x 120 mm / 400 x 840 x 120 mm / 840 x 840 x 120 mm
Půdorys (Š, D):	72524 x 610 mm / 1143 x 610 mm / 1143 x 1030 mm
Max. rychlost posuvu (X, Y, Z):	5000, 5000, 5000 mm.min ⁻¹
Přesnost stroje:	0,05 mm
Cena za nejmenší variantu:	1 099 USD \pm 25 000 Kč
Elektronika:	Shapeoko motion controller používající Grbl firmware
Vřeteno:	DeWalt DWP-611 (930 W, 16 000-27 000 min ⁻¹) Makita RT0701C (710 W, 10 000 – 30 000 min ⁻¹)
Přenos síly:	X, Y, Z – 9 mm ozubené řemeny a řemenice GT3
Lineární vedení:	X, Y, Z – integrovaná V kolejnice v extrudovaném rámu, plastová kolečka s V profilem a kuličkovými ložisky
Krokové motory:	Nema 23 bez zpětné vazby
Rám:	šroubovaný z extrudovaných hliníkový profilů a ocelových výpalků
Stůl:	MDF deska, nebo Al profily

Ukázky použití výše zmíněných konstrukčních prvků jsou zobrazeny v obrázku 5.



Obrázek 5 Ukázka konstrukčních prvků Shapeoko [4].

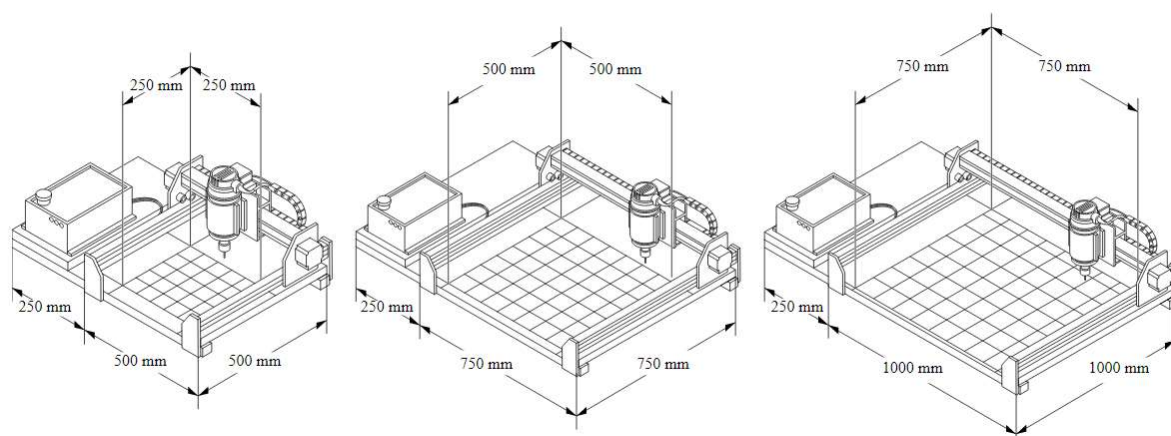
U stroje je využíváno portálové konstrukce, umožňující obrábět větší plošné obrobky. Jako lineární vedení je využíváno hliníkových profilů, které by měly zaručit přesnost. Profily jsou spojeny samořeznými šrouby přes plechové výpalky přímo do profilu. Toto řešení poskytuje pouze omezenou tuhost konstrukce. Negativní vliv na tuhost má i použití ozubených řemenů pro pohyb. Naopak výhodou je možnost dosažení posuvových rychlostí až $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a využití výkonného vřetene s velkým rozsahem otáček. Cena, přibližně 25 000 Kč, odpovídá použitým materiálům a kvalitě zpracování. Také reference dostupné na diskusních fórech jsou vesměs pozitivní. Vytykána je pouze hluchost, způsobená absencí jakéhokoliv krytování.

c) X – Carve

Parametry stroje vypsány v tabulce 3.

Tabulka 3 Parametry stroje X – Carve [5].

Výrobce:	Inventables
Obrobitelný prostor (X, Y, Z):	Dodáváno jako stavebnice ve třech velikostech – viz obr. 6. 250 x 250 x 65 mm / 500 x 500 x 65 mm / 750 x 750 x 65 mm
Půdorys (Š, D):	750 x 500 mm / 1000 x 750 mm / 1250 x 1000 mm
Max. rychlost posuvu (X, Y, Z):	8000, 8000, 500 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Přesnost stroje:	0,13 mm
Cena:	1 349 USD \pm 31 000 Kč
Elektronika:	X-Controller s Grbl firmware
Vřeteno:	DeWalt DWP-611 (930 W, 16 000 – 27 000 min^{-1})
Přenos síly:	X, Y – 9 mm ozubené řemeny a řemenice Z – lichoběžníkový rovnoramenný šroub + řemenový převod
Lineární vedení:	X, Y, Z – integrovaná U kolejnice v extrudovaném rámu, plastová kolečka s lichoběžníkovým profilem a kuličkovými ložisky
Krokové motory:	Nema 23 bez zpětné vazby
Rám:	šroubovaný z extrudovaných hliníkový profilů a ocelových výpalků
Stůl:	MDF deska



Obrázek 6 Rozměrové varianty X-Carve [5].

Stroj svou koncepcí může být přirovnán k předchozímu Shapeoko 3, který využívá hliníkové extrudované profily pro rám sloužící současně jako lineární vedení. Nicméně rozměry použitých profilů jsou znatelně menší a z toho plynoucí tuhost rámu bude také menší. Pohon os stroje je řešen opět pomocí ozubených řemenů a z toho plyne pokles celkové tuhosti konstrukce. Zdvih Z osy je pouze 65 mm, což je poloviční hodnota ve srovnání se strojem Shapeoko 3. Jedinou výhodou, v porovnání s tímto strojem, je výrobcem deklarovaná vyšší posuvová rychlost. Nicméně oba stroje jsou založeny na použití řídicí elektroniky využívající Grbl firmware, který je volně dostupný a parametry jako posuvové rychlosti, zrychlení a podobně, lze jednoduše přeprogramovat a tím upravit charakteristiku stroje. Dále cena stroje, která je přibližně 31 000 Kč je opět v porovnání s Shapeoko 3 znatelně vyšší.

d) CNC Carve King Kit Bundle

Parametry stroje vypsány v tabulce 4. Konstrukční řešení stroje je zobrazeno v obrázku 7.

Tabulka 4 Parametry stroje CNC Carve King Kit Bundle [6].

Výrobce:	MillRight
Obrobitelný prostor (X, Y, Z):	440 x 440 x 100 mm
Max. rychlost posuvu (X, Y, Z):	2500, 2500, 2500 mm.min ⁻¹
Cena:	999 USD \pm 23 000 Kč
Elektronika:	Uno USB microcontroller* s Grbl firmware a DRV8825 ovladači krokových motorů
Vřeteno:	DeWalt DWP-611 (930 W, 16 000 - 27 000 min ⁻¹)
Přenos síly:	X, Y, Z – lichoběžníkové rovnoramenné šrouby a matice se stavitelným předpětím (předepjaté)
Lineární vedení:	X, Y, Z – integrovaná U kolejnice v extrudovaném rámu, plastová kolečka s lichoběžníkovým profilem a kuličkovými ložisky
Krokové motory:	Nema 17 bez zpětné vazby
Rám:	šroubovaný z extrudovaných hliníkový profilů a poplastovaného MDF
Stůl:	MDF deska se vsazenými hliníkovými T drážkami

*Microcontroller – integrovaný obvod využívající mikroprocesor pro řízení jednoduchých operací.



Obrázek 7 Konstrukční řešení stroje CNC Carve King [6].

Méně známý výrobce Millright nabízí stolní CNC frézku založenou na portálové konstrukci. Lineární vedení je zde opět řešeno pomocí hliníkových profilů, tvořících současně rám i samotné lineární vedení stroje. Na rozdíl od předchozích strojů je však přední i zadní díl spojující tyto profily vyroben z materiálu MDF (lisovaný dřevěný materiál). Použití dřevěného dílu vs. ocelového nelze porovnávat v dosažitelné tuhosti. Výhodou stroje je osazení lichoběžníkovými rovnoramennými šrouby a maticemi se stavitelným předpětím. Cena cca 23 000 Kč je zatím nejdostupnější variantou ze všech zmíněných možností. Pouze konstrukce tvořena dřevěnými díly je brána jako značný nedostatek.

e) Stepcraft S420 V2

Parametry stroje vypsány v tabulce 5. Konstrukční řešení stroje je zobrazeno v obrázku 8.



Obrázek 8 Konstrukční řešení stroje Stepcraft S420 V2 [7].

Tabulka 5 Parametry stroje Stepcraft S420 V2 [7], [8].

Výrobce:	Stepcraft
Obrobitelný prostor (X, Y, Z):	420 x 300 x 140 mm
Půdorys (Š, D):	552 x 440 mm
Max. rychlost posuvu (X, Y, Z):	3000, 3000, 3000 mm.min ⁻¹
Přesnost stroje:	0,05 mm
Cena:	33 000 Kč – sestavený stroj bez vřetene 5 000 Kč – nejlevnější vřeteno v nabídce
Elektronika:	Stepcraft USB ovladač
Vřeteno:	Kress, Proxxon, Stepcraft vysokofrekvenční vřeteno
Přenos síly:	X, Y, Z – lichoběžníkové rovnoramenné šrouby a matice se stavitelným předpětím (předepnuté)
Lineární vedení:	X, Y, Z – integrovaná U kolejnice v extrudovaném rámu, ocelová kolečka s U profilem a kuličkovými ložisky
Krokové motory:	Nema 17 bez zpětné vazby
Rám:	šroubovaný z extrudovaných hliníkový profilů a hliníkových výpalků
Stůl:	HPL – vysokotlaký laminát

Stroj S420 V2 je navržen jako konfigurovatelný, což znamená, že lze vyměnit vřeteno za extruder pro 3D tisk, hlavu osazenou odporovým drátem pro řezání pěnových materiálů nebo nožem určeným pro řezání folií. Lineární vedení je zde řešeno pomocí vlastních hliníkových profilů integrovaných v rámu stroje. Pro pohon jsou použity lichoběžníkové rovnoramenné šrouby a matice se stavitelným předpětím. Nevýhodami jsou nutnost použití výrobcem vyvinutého softwaru pro řízení stroje a omezení na využití příslušenství vyráběného výrobcem stroje. Toto příslušenství je adekvátně oceněno.

Dále absence postprocesoru v softwaru Fusion 360 (mezi uživateli malých CNC frézek hojně využívaného). Výhodou je možnost pořízení stroje ve formě stavebnice, kdy je cena příznivější.

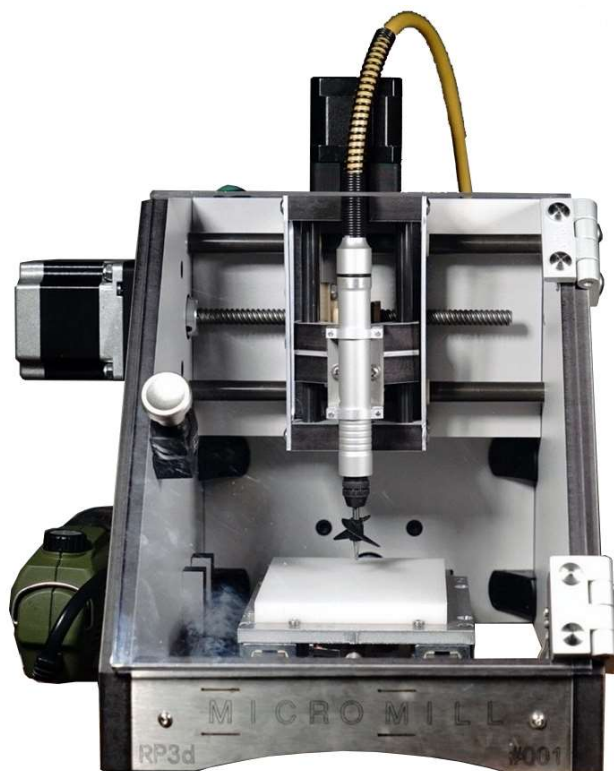
Z doplňků je k dispozici mimo řezacích a gravírovacích nástavců také extruder pro 3D tisk, několik vřeten i s možností automatické výměny nástroje a designové krytování stroje. Cena cca 33 000 Kč zahrnuje pouze sestavenou platformu stroje bez jakéhokoliv příslušenství. Cena vřetene také není započtena. V porovnání s předchozími stroji je výrazně vyšší cena kompenzována velkým množstvím doplňků dodávaných výrobcem. Nevýhodou je, že s každým dalším doplňkem je cena značně zvyšována.

f) Micromill

Parametry stroje vypsány v tabulce 6. Konstrukční řešení stroje je zobrazeno v obrázku 9.

Tabulka 6 Parametry stroje Micromill[9], [10], [11].

Výrobce:	RP3D
Obrobitelný prostor (X, Y, Z):	115 x 100 x 64 mm
Půdorys (Š, D):	262 x 196 mm
Přesnost stroje:	0,01 mm
Cena:	840 GBP \pm 25 000 Kč
Elektronika:	Uno USB microcontroller s Grbl firmware
Vřeteno:	Proxxon 28481 (100 W, 5000 - 20 000 min ⁻¹)
Přenos síly:	X, Y, Z – lichoběžníkové rovnoramenné šrouby a plastové matice (materiál iglidur – tvrdší PTFE)
Lineární vedení:	X, Z – ocelové tyče a lineární kluzná pouzdra s vložkou z materiálu iglidur Y – lineární kolejnice (Al) a vozíčky s kluznou vložkou z materiálu iglidur
Krokové motory:	X, Y – Nema 23 bez zpětné vazby Z – Nema 17 bez zpětné vazby
Rám:	šroubovaný z polykarbonátových desek a plechových výlisků
Stůl:	Al



Obrázek 9 Konstrukční řešení stroje Micromill [10].

Micromill je CNC frézka s nejmenším obrobitelným prostorem z celého výřtu. Uspořádání stroje je s vřetenem pohybujícím se v ose X a Z a obrobkem pohybujícím se v ose Y. Využívá vřetene, jehož motor je umístěn mimo prostor stroje a vřeteno poháněno pomocí ohebného hřídele. Lineární vedení je realizováno pomocí ocelových profilů a vozíčků s kluznou vložkou tvořenou plastovým materiálem zvaným iglidur. Stejný materiál je použit i pro pohybové matice. S cenou přibližně 25 000 Kč je stroj cenově výhodnější alternativou ke stroji Nomad 883 Pro, v případě, že nevadí menší obrobitelný prostor. Otázkou zůstává, zda se stroj dostane do prodeje. Výše zmíněné informace jsou čerpány převážně ze serveru Kickstarter.com, kde tvůrci publikovali jejich kampaň a následně dodali několik strojů. Zatím však není k dispozici e-shop, kde by bylo možno stroj objednat.

g) Pocket NC V2 – 10

Parametry stroje vypsány v tabulce 7. Konstrukční řešení stroje je zobrazeno v obrázku 10.

Tabulka 7 Parametry stroje Pocket NC V2 – 10 [12].

Výrobce:	Pocket NC
Obrobitelný prostor (X, Y, Z):	105 x 120 x 90 mm
Půdorys (Š, D):	445 x 229 mm
Max. rychlost posuvu (X, Y, Z):	1500, 1500, 1500 mm.min ⁻¹
Max. rychlost rotace (A, B):	40, 40 °.s ⁻¹
Přesnost stroje:	0,006 mm; 0,01°
Cena:	5 500 USD ± 126 000 Kč
Elektronika:	BeagleBone Black board používající Machinekit/Rockhopper firmware
Vřeteno:	BLDC 3fázový motor se zpětnou vazbou pomocí Hallovi sondy, 200 W, 2000 - 10 000 min ⁻¹
Přenos síly:	X, Y, Z – lichoběžníkové rovnoramenné šrouby s předepnutými maticemi A, B – šnekový převod
Lineární vedení:	X, Y – lineární kolejnice 9 mm a lineární kuličkové vozíky Z – lineární kolejnice 42 mm a lineární kuličkový vozík A, B – ložiska s kosoúhlým stykem
Krokové motory:	NEMA 17 bez zpětné vazby
Rám:	šroubovaný z Al (6061) frézovaných dílů
Stůl:	Al

Stroj je vybaven automatickým měřením délky nástroje.



Obrázek 10 Konstrukční řešení stroje Pocket NC V2 – 10 [12].

Pocket NC se od ostatních zmiňovaných strojů liší použitím pěti os, které je schopen řídit současně. Tři osy jsou translační a dvě rotační s horizontálním umístěním vřetene. Pro lineární vedení jsou použita lineární vedení s kuličkovými vozíky. Pro vedení rotačních os jsou použita ložiska s kosoúhlým stykem. O přenos krouticího momentu z krokových motorů se starají lichoběžníkové rovnoramenné šrouby s předepnutými maticemi a v případě rotačních os šnekové převody.

Stroj je vybaven snímačem pro automatické měření délky nástroje. Výhodou je integrace postprocesoru v oblíbeném a uživatelsky přívětivém softwaru Fusion 360. Výrobce poskytuje mimo jiné online simulační nástroj pro testování vygenerovaných programů. Současně se jedná o bezkonkurenčně nejdražší stroj v celém výčtu.

V době psaní této práce výrobce chystal uvedení na trh stroje V2 – 50, tedy identického stroje osazeného vřetenem s rozsahem otáček 1 000 až 50 000 min⁻¹.

h) Benchtop Standard 2424

Parametry stroje vypsány v tabulce 8. Konstrukční řešení stroje je zobrazeno v obrázku 11.

Tabulka 8 Parametry stroje Benchtop Standard 2424 [13].

Výrobce:	CNC Router Parts
Obrobitelný prostor (X, Y, Z):	635 x 635 x 278 mm
Půdorys (Š, D):	1067 x 1080 mm
Max. rychlost posuvu (X, Y, Z):	7620, 7620, 7620 mm.min ⁻¹
Přesnost stroje:	0,06 mm
Cena:	2 000 USD \approx 46 000 Kč
Elektronika:	NEMA 23 CNC řídicí systém s možností přidání 4. osy
Vřeteno:	DeWalt DWP-611 (930 W, 16 000 - 27 000 min ⁻¹)

Přenos síly:	X, Y, Z – lichoběžníkové rovnoramenné šrouby s předepjatými maticemi
Lineární vedení:	X, Y, Z – lineární kolejnice a lineární kuličkové vozíky
Krokové motory:	NEMA 23 bez zpětné vazby
Rám:	šroubovaný z extrudovaných hliníkový profilů a ocelových výpalků
Stůl:	dřevo, nebo extrudované profily s T-drážkou



Obrázek 11 Konstrukční řešení stroje Benchtop Standard 2424 [13].

Firma CNC Router Parts se zabývá výrobou vysoce modulárních CNC strojů, určených především pro truhlářské využití, kdy je k dispozici i několik verzí s plochou pro upnutí celé tabule překližky. Benchtop Standard 2424 je postavený na stejném principu, využívající stavebnicových hliníkových profilů, spolu s ocelovými výpalky tvořícími rám stroje. V tomto případě je stroj osazen lineárními kolejnicemi s kuličkovými vozíky na všech osách. Pro přenos krouticího momentu z krokových motorů jsou použity lichoběžníkové rovnoramenné šrouby s předepjatými maticemi. V základní verzi je stroj dodáván bez stolu, jen s jeho nosným rámem a počítá se s přišroubováním dřevěné desky zákazníkem – viz obr. 12 vpravo.

Za příplatek je možno frézku osadit stolem, tvořeným opět stavebnicovými hliníkovými profily – viz obr. 12 vlevo. Dále je možné stroj doplnit o 4. osu. Pravděpodobně vzhledem k použití kvalitních lineárních vedení je pořizovací cena přibližně 46 000 Kč.

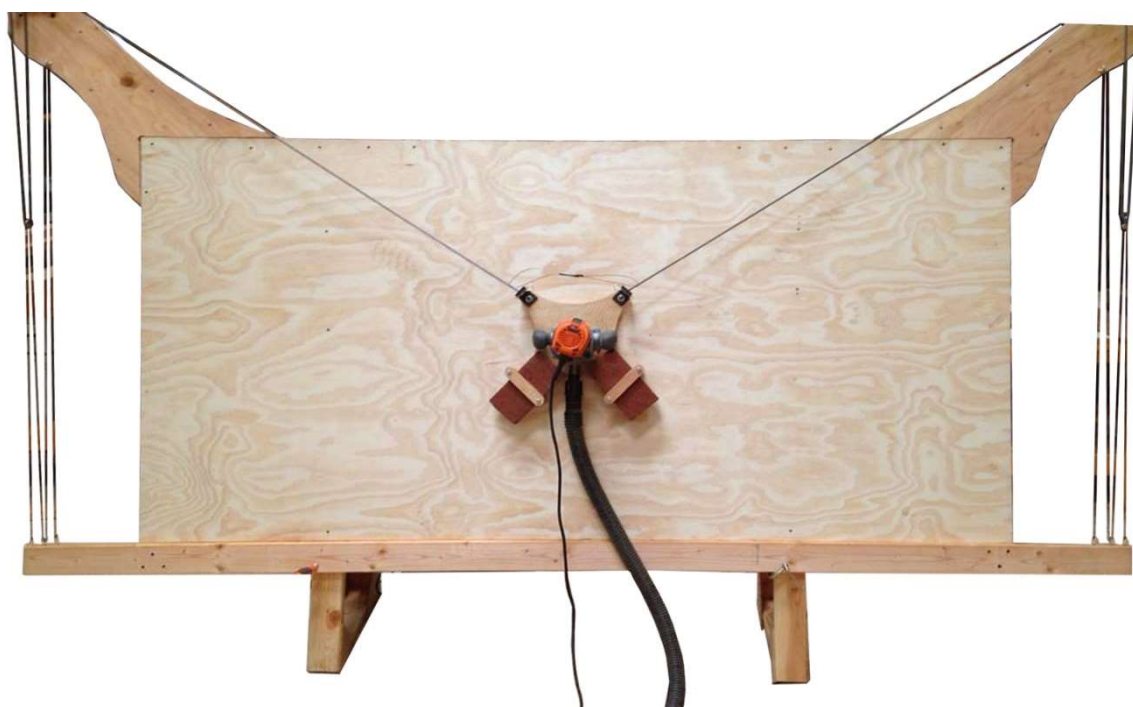
i) Maslow CNC kit

Parametry stroje vypsány v tabulce 9. Konstrukční řešení stroje je zobrazeno v obrázku 12.

Tabulka 9 Parametry stroje Maslow CNC kit [14], [15], [16].

Výrobce:	Maslow
Obrobitelný prostor (X, Y, Z):	1 220 x 2 440 x 50 mm
Půdorys (Š, D):	3 050 x 480 mm
Max. rychlost posuvu (X, Y, Z):	1 000 mm.min ⁻¹
Přesnost stroje:	0,4 mm
Cena:	499 USD \pm 11 000 Kč

Elektronika:	Arduino Mega + nástavba TLE206 s Maslow Firmware
Vřeteno:	Doporučeno Ridgid R2200 (1 500 W, 10 000 - 23 000 min ⁻¹)
Přenos síly:	X, Y – řetězová kola a válečkové řetězy Z – lichoběžníkový rovnoramenný šroub
Lineární vedení:	Lineární vedení tvoří obráběný materiál v kombinaci s gravitací
Krokové motory:	DC motory s rotačními enkodéry v kombinaci s miniaturními převodovými skříněmi
Rám:	Dřevěné profily a překližka
Stůl:	Není



Obrázek 12 Konstrukční řešení stroje Maslow CNC [15].

Maslow CNC je 2,5 D obráběcí stroj, který pracuje v téměř vertikální poloze. Jeho princip je založen na tzv. paralelní kinematické struktuře. U ostatních zmíněných strojů stačí pro pohyb v jedné ose pohyb jednoho motoru. U paralelní kinematické struktury je pro pohyb v jedné ose zapotřebí pohybu tří motorů. V případě Maslow CNC stačí dva motory. Díky svislé orientaci třetí motor zastoupí gravitace, jejíž efekt je podpořen přídatným závažím. Hlavní výhodou je malá prostorová náročnost v kombinaci s nízkou cenou. Mimo možnosti zakoupení stroje, je celý projekt, dokumentace a software, zdarma dostupný na webových stránkách výrobce. To znamená, že každý si jej může replikovat a díky konstrukci využívající běžné cyklo řetězy, které lze snadno zkrátit nebo prodloužit, lze celý stroj přizpůsobit konkrétním požadavkům na rozměry.

Poznámka:

„Přesnost číslíkově řízených CNC strojů je dána součtem chyb řídicího systému a mechanických chyb [17].“

3 NÁVRH STROJE

3.1 Požadavky na navrhovaný stroj

Cílem práce je návrh stolní modelářské frézky pro opracování dřeva, plastů a podobných materiálů převážně ve formě plošných polotovarů.

Je požadován obrobitelný prostor 400 mm v ose X, 300 mm v ose Y a 100 mm v ose Z. Požadovaná maximální rychlost posuvu je 4000 mm.min⁻¹.

Cena vstupního materiálu by neměla přesáhnout 20 000 Kč / 1 kus.

Jako vřeno je použito některé z dostupných vřeten, primárně prodáváných pro použití jako horní frézka.

3.2 Koncepce stroje

Na základě předchozích informací je využito uspořádání, kdy se vřeteno pohybuje ve všech třech osách. Toto řešení je výhodné pro plošné obrobky s relativně malým rozsahem v ose Z. Konstrukce je navržena jako portálová. Rám svařovaný, jako kombinace ocelových profilů a plechů. Konečný návrh bude využívat svarků ocelových profilů a plechů, doplněných o montovaná, kalená lineární vedení. Vzhledem k vyšší ceně a náročnosti výroby této konstrukce, bude nejdříve pro odladění elektroniky a pohonů postaven testovací prototyp s některými zjednodušujícími prvky v konstrukci rámu. Ten bude využívat základních profilů tvořících rám jako lineárního vedení, což pro reálný provoz není optimální varianta z hlediska přesnosti a životnosti.

Frézka je určena zejména pro modelářské obrábění dřeva a plastových materiálů, což znamená především větších plošných polotovarů a obrobků, převážně pro kusovou výrobu s nižšími nároky na přesnost. Pro tento typ obrobků je vhodné využít již zmíněné portálové konstrukce. Osy X a Y mají větší rozsah oproti ose Z. Půdorys stroje je odvozen od rozměrů obrobitelné plochy, která by měla být 400 mm v ose X a 300 mm v ose Y.

3.3 Konstrukce rámu

Pro konstrukci nosné soustavy obráběcího stroje lze využít různé materiály, nejčastěji šedou litinu, ocel i ocelolitinu, neželezné materiály, jako beton a polymerbeton – viz tabulka 10 [18].

Tabulka 10 Materiály pro stavbu rámu [18].

Materiály pro stavbu rámu			
Kovové	Nekovové	Kombinované	Přírodní
<ul style="list-style-type: none"> litina ocel (svarky, odlitky) 	<ul style="list-style-type: none"> částicové kompozity vláknové kompozity 	<ul style="list-style-type: none"> Ocelový svarek a výplň tlumícím materiálem 	<ul style="list-style-type: none"> Kámen (žula)

Z důvodu dosažení co nejnižší ceny při kusové výrobě je zvolen rám svařovaný z plechových dílů a tenkostěnných profilů doplněných o montovaná kalená lineární vedení. Toto řešení je, pro účel obrábění především dřevěných a plastových materiálů, přijatelným kompromisem mezi cenou a celkovou tuhostí.

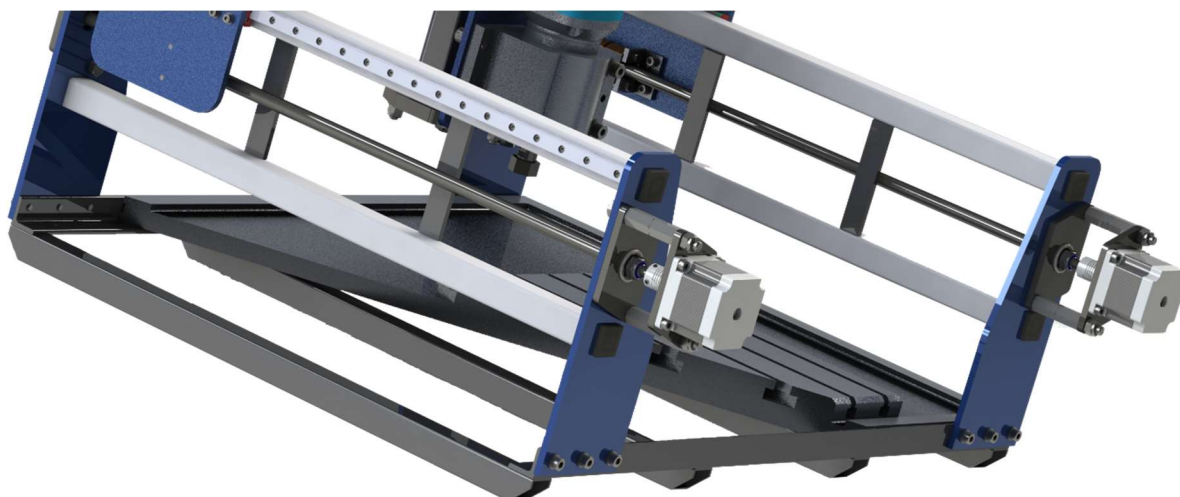
Je dokázáno, že v místech svarů dochází k nepatrným pohybům jednotlivých profilů nebo plechů. Ty se ve svaru stýkají a zmíněné pohyby způsobují tření, jež má za následek přeměnu kinetické energie na tepelnou a z toho vyplývající tlumení vibrací. Pro předcházení vzniku pnutí je nezbytné, vhodně zvolit postup při svařování. Důležitým prvkem je návrh kratších přerušovaných svarů [18].

Nejlepší vlastnosti by byly dosaženy použitím masivnějšího odlitku, kdy je však nutno počítat s vysokou cenou při malém množství vyrobených kusů. Pro konstrukci bude využito co největšího procenta typizovaných a běžně dostupných dílů. Součásti z plechu budou zhotoveny vypálením pomocí laseru.

Portál a dráhy pro posuv jsou navrženy z tenkostěnných profilů čtvercového průřezu. Aby byla zaručena rovnoběžnost a kolmost svarku, je při svařování použito přípravků navrhovaných pro tento účel. Přípravek by měl rovněž pomoci předejít deformaci vyvolané svařováním.

Vzhledem k ceně materiálu a náročnosti výroby této konstrukce, bude nejdříve pro odladění elektroniky a pohonů postaven testovací prototyp s některými zjednodušeními v konstrukci rámu. Ten bude využívat základních profilů tvořících rám jako lineárního vedení (bez použití kalených kolejnic), což pro reálný provoz není optimální varianta z hlediska přesnosti a životnosti. Pro testování elektroniky a ověření celkové koncepce, při nízké výrobní ceně, je však toto řešení dostatečné. Finální konstrukce bude využívat téměř stejných svarků z ocelových profilů a výpalků. Rozdíl bude v pootočení čtvercových profilů o 45° a vlastní profily budou fungovat pouze jako nosný rám montovaného lineárního vedení.

Základna stroje je tvořena svarkem z ocelového profilu se čtvercovým průřezem 25 x 2 mm a L profilu 25 x 25 x 3 mm – viz obrázek 13. V rámu je vložena MDF deska, ze spodní strany přišroubována vruty do dřeva, jejíž výměna je při poškození velmi snadná. V případě potřeby je též možné ji vyměnit za hliníkový stůl s T drážkami.

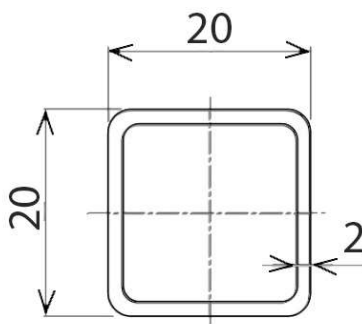


Obrázek 13 Řez stolem – vizualizace základny stroje.

3.3.1 Volba profilů pro rám

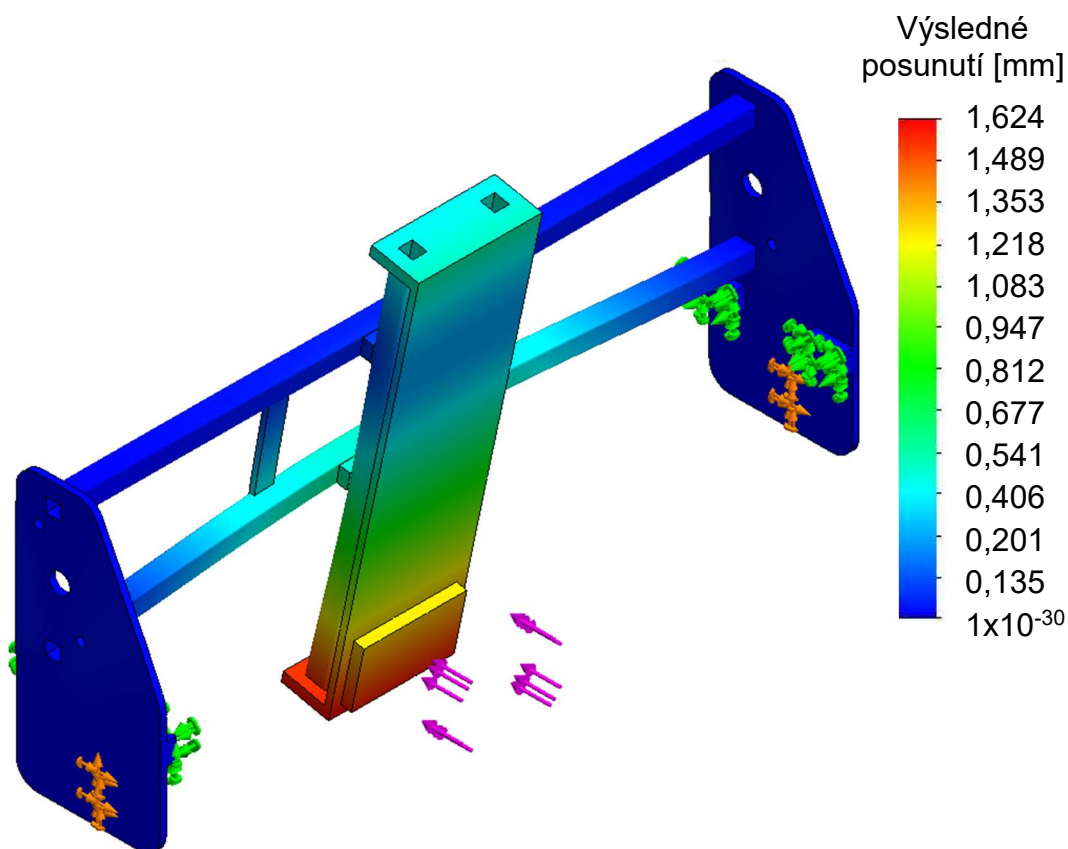
Pro návrh bylo voleno ze dvou variant tenkostěnného ocelového profilu se čtvercovým průřezem – viz obr. 14. Pro obě varianty byla provedena simulace deformace výsledného rámu. Pro simulaci – viz obr. 15 a 16 bylo použito zjednodušené sestavy X a Z osy. Sestava byla v místě umístění držáku vřetene zatížena kolmou silou 500 N. 500 N je více než 5-ti násobek posuvové síly. Ta byla následně vypočtena, při dimenzování krokových motorů.

a) 20x2 ČSN EN 10219-2 ocel S235JRH (obdobná 11 373)



Obrázek 14 Tenkostěnný ocelový profil 20x2 mm [19].

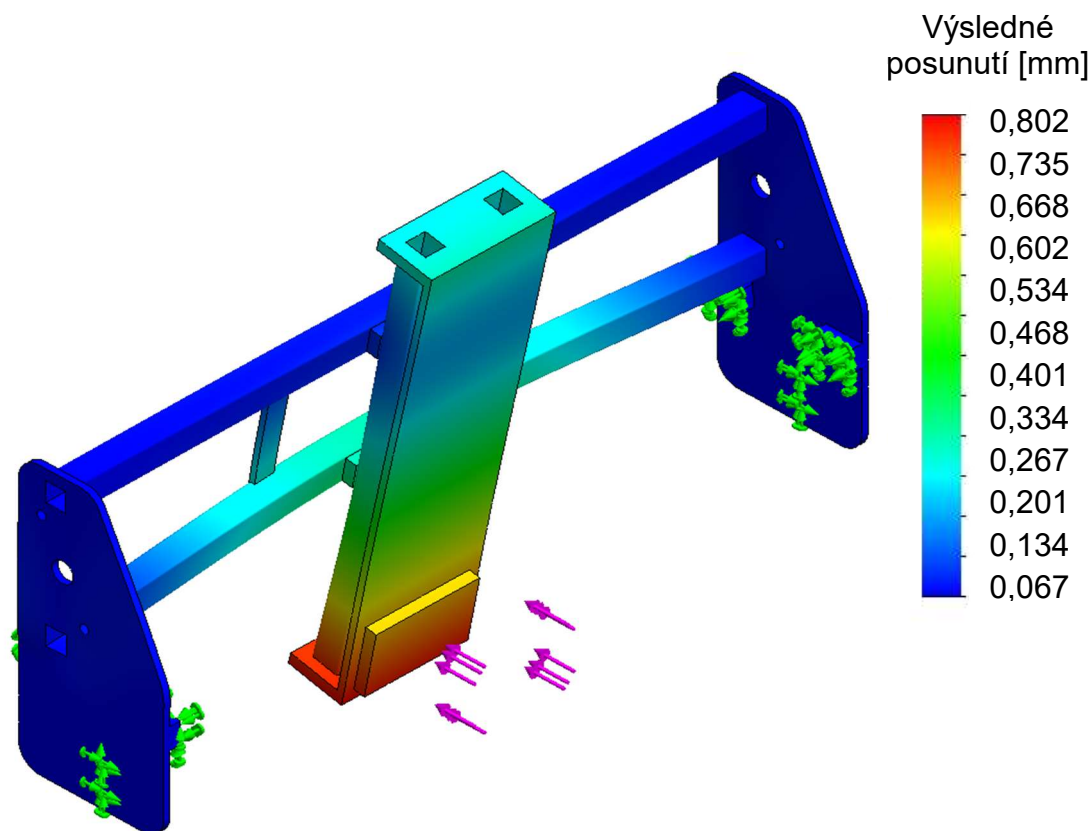
Hmotnost na 1 m: $M = 1,081 \text{ kg.m}^{-1}$
 Kvadratický moment průřezu: $I = 6\,900 \text{ mm}^4$
 [19]



Obrázek 15 Grafické znázornění výsledného posunutí (profil 20x2).

b) 25x3 ČSN EN 10219-2 ocel S235JRH (obdobná 11 373)

Hmotnost na 1 m: $M = 1,832 \text{ kg.m}^{-1}$
 Kvadratický moment průřezu: $I = 18\,400 \text{ mm}^4$
 [20]



Obrázek 16 Grafické znázornění výsledného posunutí (profil 25x3 mm).

Při porovnání prvního a druhého navrhovaného profilu je nárůst kvadratického momentu 63 %, ale nárůst hmotnosti jen 41 % u profilu stejné délky. Současně maximální výsledné posunutí při zatížení rámu v případě profilu 20x2 mm je 1,6 mm, Při použití profilu 25x3 mm vychází toto posunutí na polovinu, tedy 0,8 mm. Pro zvýšení tuhosti celého rámu je na místo profilu 20x2 mm zvolen profil 25x3 mm.

3.3.2 Díly vypálené z ocelového plechu

Rám je svařen z ocelových profilů se čtvercovým průřezem a plechových výpalků viz obr. 1 v úvodu. Plechové výpalky tvoří hlavní nosnou konstrukci rámu, desku pro uchycení držáku vřetene a ložisková tělesa. Vše ze stejné tloušťky plechu, aby bylo možno díly vypálit z jedné tabule plechu a minimalizovaly se tím náklady na výrobu. Díly jsou vypáleny pomocí laseru. Alternativně lze použít vypalování pomocí plazmového paprsku, kdy je nižší dosahovaná přesnost kompenzována nižší cenou výpalků.

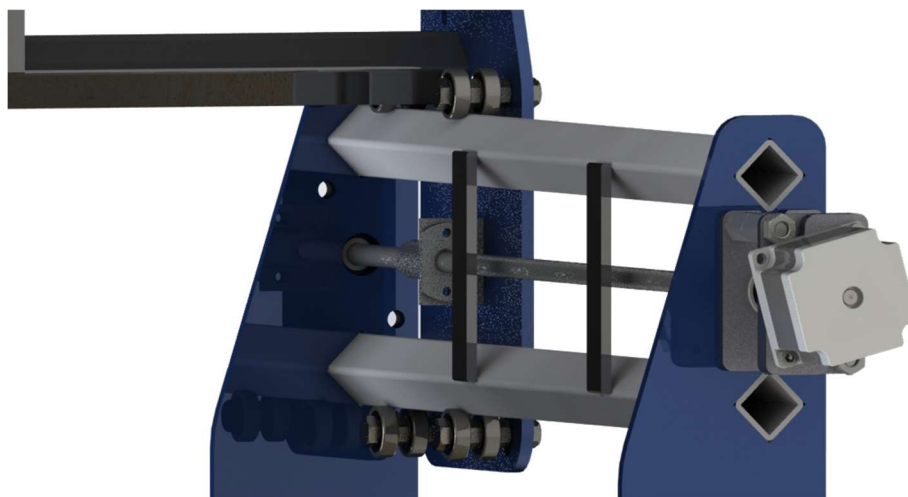
Pro výrobu je zvolen materiál P 6 – 1250 x 2500 ČSN 425310 – 11 373.1 ČSN 42 0209.50; materiál se zaručenou svařitelností [21].

Materiál 11 373 je dle EN ISO označen jako S235JRG1 [21]

Pozn.: Velikost tabule uvedena pouze pro úplnost označení. Výroba výpalků laserem je prováděná v kooperaci a velikost tabule závisí na možnostech použitého stroje.

3.4 Lineární vedení

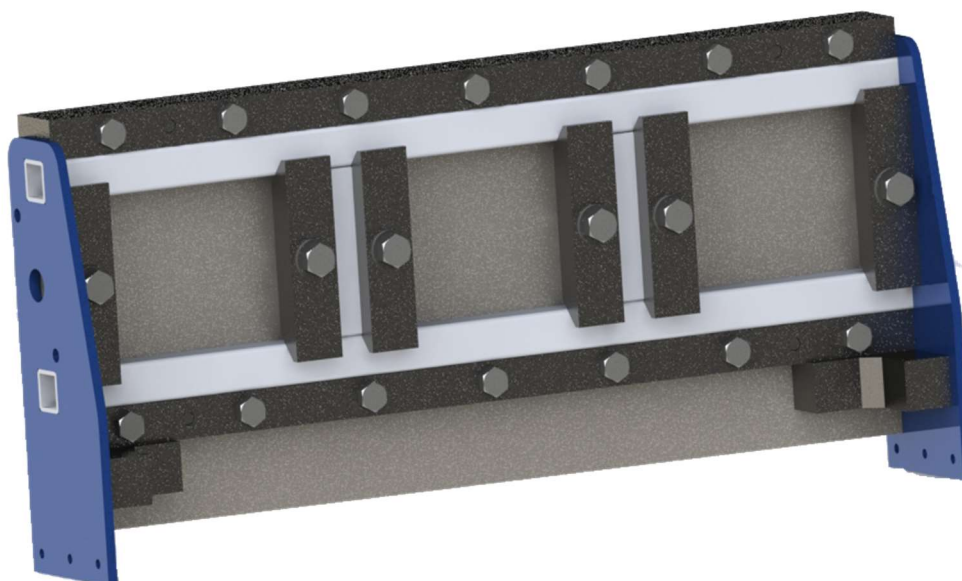
Lineární vedení testovacího prototypu je pouze pro experimentální účely, tvořeno čtyřmi páry kuličkových ložisek a rozpěrek, vždy dva pevné páry a dva stavitelné, pro vymezení. Ložiska jsou upevněna na ocelovém výpalku. Kuličková ložiska zajišťují, oproti strojům využívajícím plastových koleček, tuhé vedení bez zbytečného tření. Princip rozložení – viz obr. 17.



Obrázek 17 Experimentální lineární vedení na testovacím prototypu.

Finální řešení konstrukce využívá ocelových profilů pouze jako nosného rámu pro lineární vedení tvořené kalenými, broušenými kolejnicemi a kuličovými vozíky – viz obr. 19. Kolejnice jsou šroubovány na profil. Stěna profilu, určena k montáži lineární kolejnice, bude po dokončení svařování srovnána frézováním, aby byla zajištěna její rovinnost a rovnoběžnost, případně kolmost k základně.

Pro co nejmenší deformaci rámu je nutno využít vhodně navrženého postupu při svařování v kombinaci s žíháním pro odstranění vnitřních pnutí a až následně obrábět. Pro dosažení potřebné přesnosti svarku jsou všechny díly rámu po celou dobu svařování upnuty ve svařovacím přípravku – viz obr. 18.



Obrázek 18 Svařovací přípravek.

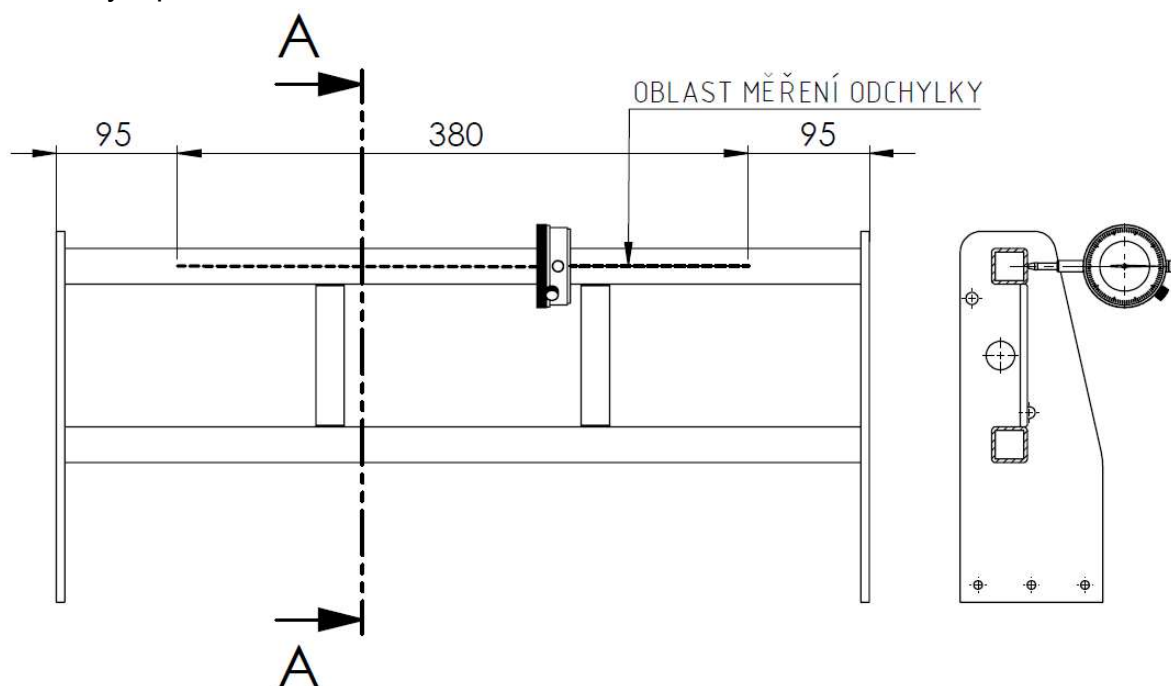
Svařovací přípravek zajišťuje správnou rozteč čtvercových profilů, plechových čel a výztuh. Dále napomáhá zajištění kolmostí a rovinností rámu, spolu s potlačováním deformace během svařování.

Využití kalených lineárních kolejnic – viz obrázek 19 je nezbytné pro dosažení dostatečné přesnosti a dlouhé životnosti stroje.



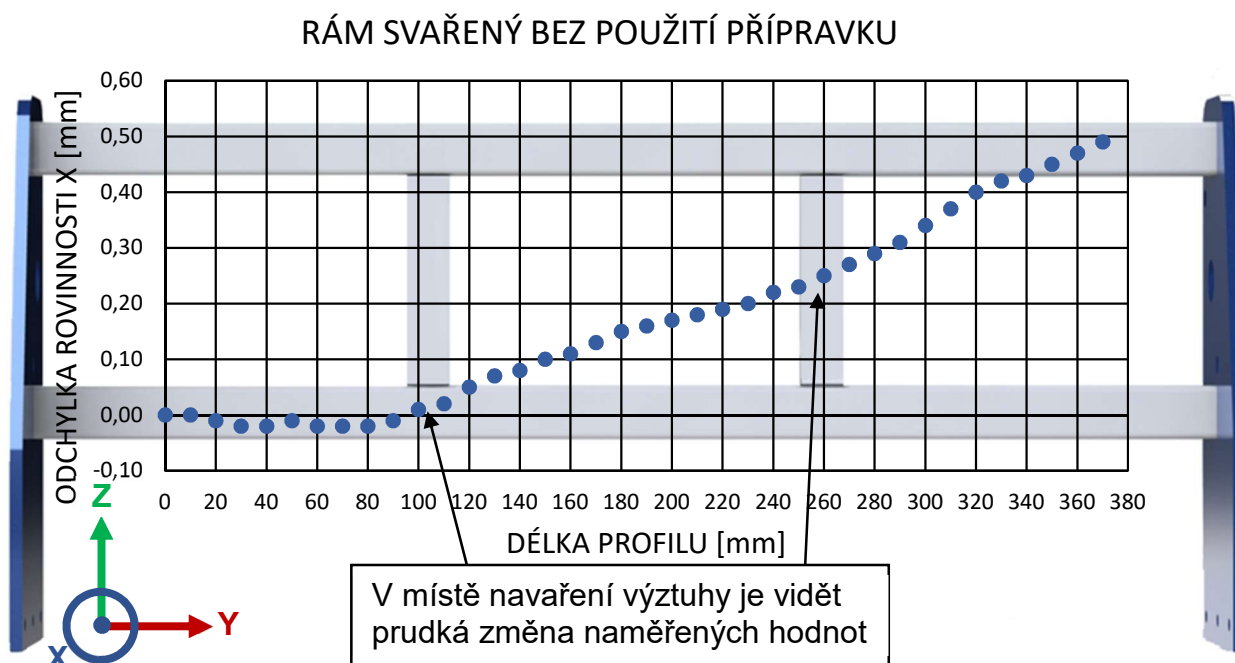
Obrázek 19 Detail umístění lineárních vedení.

Na hotovém svarku bylo provedeno měření odchylky rovnoběžnosti plochy, určené pro montáž lineárního vedení, vzhledem k základně. K měření bylo použito číselníkového úchylkoměru upnutého na vřeteník frézky. Samotný svarek byl umístěn na stůl frézky. Měření bylo provedeno v ose X – viz schéma měření obr. 20.



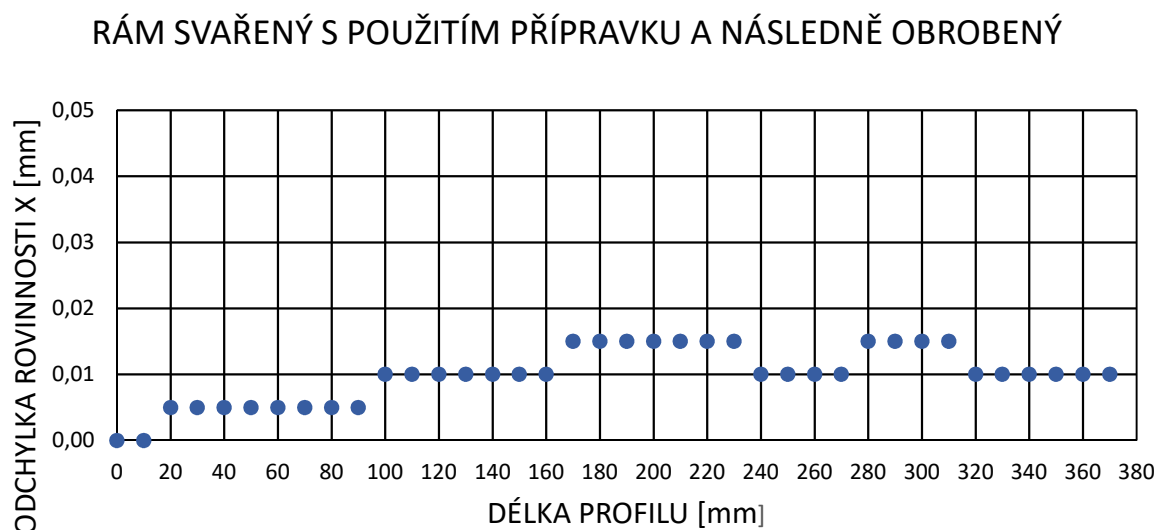
Obrázek 20 Schéma měření.

Pro porovnání byly měřeny dva svarky. Rám svařený bez použití svařovacího přípravku a druhý rám, svařený za použití svařovacího přípravku a následně obrobený. Naměřené hodnoty pro rám svařený bez použití přípravku jsou znázorněny v grafu – viz obr. 21.



Obrázek 21 Výsledky měření neobrobeného svarku svařeného bez použití přípravku.

Z grafu je patrné, že po svaření došlo k deformaci v místě navaření žeber. Tepelným ovlivněním při svařování dojde k deformaci až 0,5 mm. Pro omezení deformace je použit svařovací přípravek. Svařovací přípravek je sešroubovaný z ofrézované ocelové desky a čtvercových tyčí. Při použití přípravku a následném obrobení plochy pro umístění lineárního vedení je výsledek měření znázorněn v grafu – viz obr. 22, ze kterého je patrné, že deformace se pohybuje v rozmezí 0,02 mm a nesouvisí s umístěním navařených výztuh.



Obrázek 22 Výsledky měření obrobeného svarku svařeného s použitím přípravku.

3.5 Převod krouticího momentu

Převod krouticího momentu z krokových motorů na lineární vedení je u strojů podobné charakteristiky, dostupných na trhu, řešen využitím šroubových nebo řemenových převodů. Výhodou řemenových převodů je dosažení vyšších posuvových rychlostí na úkor tuhosti konstrukce. Nevýhodou šroubových převodů je přítomnost vůle v závitu. Vůle je zapříčiněna mezerou mezi závity šroubu a matice.

Pro převod krouticího momentu je použit šroubový převod a z toho vyplývající nutnost vyřešit zmiňovanou vůli v závitu.

Na trhu je k dispozici několik způsobů, jak eliminovat tuto vůli. Tato řešení využívají dvou matic, navzájem odtlačovaných pružinou – viz obr. 23 vlevo. Nebo využívají jedné podélně rozdělené matice, opět stlačované pružným prvkem (pružinou, pryžovým nákrůžkem, atd.) – viz obr. 23 uprostřed. Dalším z dostupných řešení je matice, u které dochází k vymezení vůle vyosením její části – viz obr. 23 vpravo. Vymezení vůle je tedy způsobeno deformací profilu závitu.



Obrázek 23 Dostupné předepjaté matice [23], [24], [25].

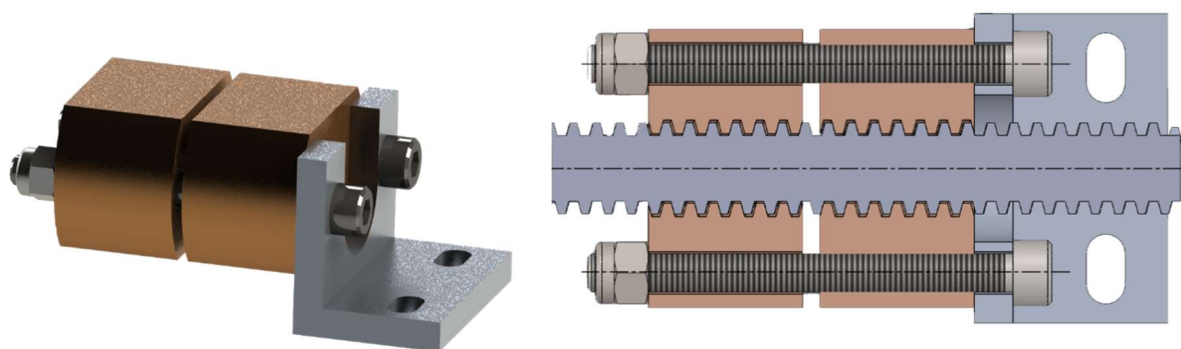
Řešení využívající pružiny jsou vhodná spíše pro použití na 3D tiskárnách a strojích, kde nedochází k velkým změnám odporu při posuvu.

Na navrhované frézce jsou použity lichoběžníkové rovnoramenné šrouby Tr 12x3 a bronzové matice, s možností předepnutí, pro vymezení vůle.

Pro vymezení vůle bylo navrženo použití dvou matic, navzájem předepnutých pomocí šroubů – viz obr. 24. Umístěním dvou matic za sebe a jejich vzájemným předepnutím lze zcela eliminovat vůli v závitu – viz obr. 24 vpravo.

Výhodou předepnutí pomocí šroubů je konstantní vzdálenost mezi oběma polovinami matice i při nárůstu odporu během posuvu. Této vlastnosti při použití pružinou předepjaté matice nelze docílit.

Pro porovnání statický součinitel tření ocel – ocel je 0,78; ocel – bronz (hliníkový) je 0,45 a ocel – mosaz je 0,35 [26].

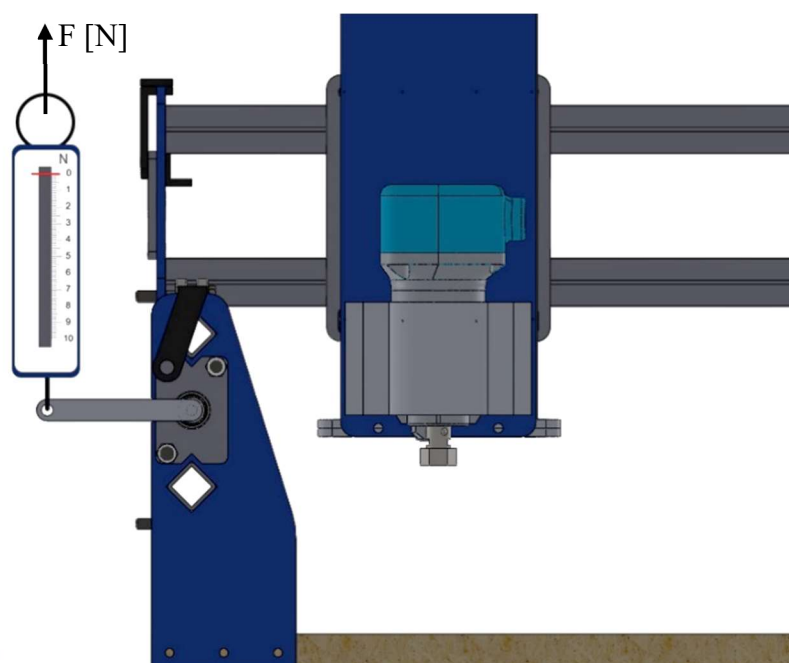


Obrázek 24 Navrhované řešení předejpaté matice.

Osazení kuličkovými šrouby se jeví jako zbytečně nákladné vzhledem k celkové koncepci stroje. Výhodou by v takovém případě bylo dosažení vyšší posuvové rychlosti a delší životnosti oproti předchozí variantě. S použitím kuličkových šroubů je uvažováno jako možné vylepšení do budoucna, v případě větší vytiženosti stroje.

3.5.1 Porovnání předejpaté a nepředejpaté matice

Krouticí moment, potřebný pro uvedení lichoběžníkového šroubu do pohybu, byl zjištěn experimentálně, za pomoci siloměru umístěného na rameni dlouhém 100 mm – viz obr. 25. Bylo provedeno deset měření a vypočtena střední hodnota. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 11.



Obrázek 25 Schéma měření.

Výpočet krouticího momentu dle vztahu (3.1).

$$M_K = F * d \text{ [Nm]} \quad (3.1)$$

$M_K \text{ [Nm]}$ – kroutící moment

$F \text{ [N]}$ – síla potřebná k uvedení do pohybu

$d \text{ [m]}$ – délka ramene pro měření = 100 mm

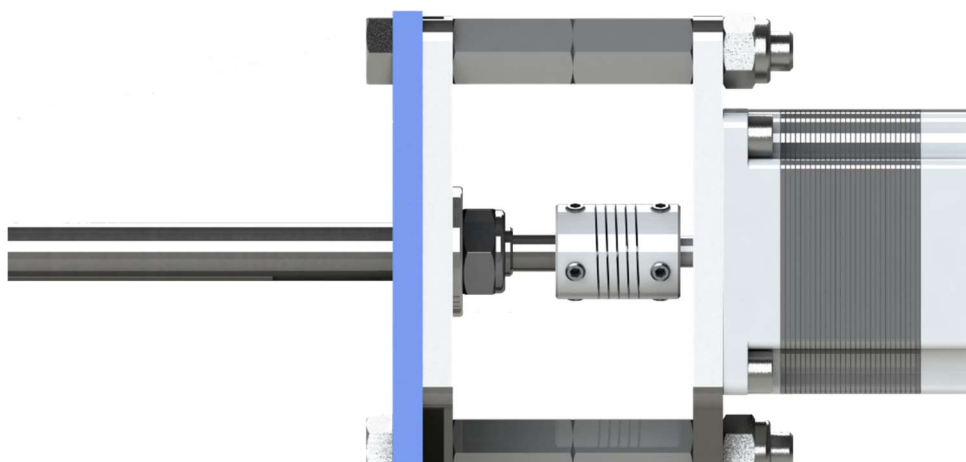
$$M_K = 0,39 * 0,1 = 0,039 \text{ Nm} \rightarrow 0,04 \text{ Nm}$$

Tabulka 11 Výsledky měření předepjaté a nepředepjaté matice.

Č.m.	F _{nepřed} [N]	F _{před} [N]
1	0,3	2,2
2	0,3	2,3
3	0,5	2,2
4	0,4	2,3
5	0,3	2,1
6	0,4	2,3
7	0,5	2,1
8	0,5	2
9	0,3	2,1
10	0,4	2,3
Φ	0,39	2,19

Z měření vyplývá, že síla na rameni $d = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$, potřebná pro uvedení portálu do pohybu s jednoduchou nepředepjatou maticí je 0,39 N. Po přepočtení a zaokrouhlení je nutný moment 0,04 Nm. Při použití předepjaté matice je nutný kroutící moment 0,2 Nm.

Lichoběžníkové šrouby jsou spojeny s krokovými motory pomocí pružných spojek – viz obr. 26, eliminujících nesouosost současně s tlumením rázů.



Obrázek 26 Pružná spojka krokového motoru.

4 NÁVRH ŘÍZENÍ

Pro řízení konvenčních CNC frézek jsou používány průmyslové řídicí systémy vyvíjené přímo výrobcí strojů, nebo osazené systémy převládajícími na trhu (Siemens, Fanuc, a podobné). Ty však svou cenou i funkcemi zdaleka přesahují požadavky pro použití k řízení stolní CNC frézky. Jako způsoby řízení potencionálně vhodné pro popisovanou aplikaci se hodí následující varianty.

a) Řízení založené na PC

Pro interpretaci G – kódu na signály pro ovladače krokových motorů je využit počítač s nainstalovaným rozhraním (nejpoužívanější Mach3, Mach4 a LinuxCNC) a přes LPT port jsou k němu připojeny přímo ovladače krokových motorů. Často jsou využívány oddělovací desky, připojené přes LPT port, která usnadňuje připojení ovladačů a ostatních prvků. Hlavním omezením je princip komunikace, kdy každý pin LPT portu slouží pouze pro jeden určitý signál.

Alternativou jsou řídicí desky používající komunikaci přes ethernetový port, kde počítač slouží pouze pro posílání G – kódu a o jeho zpracování se stará vlastní řídicí deska.

b) Microcontrollery

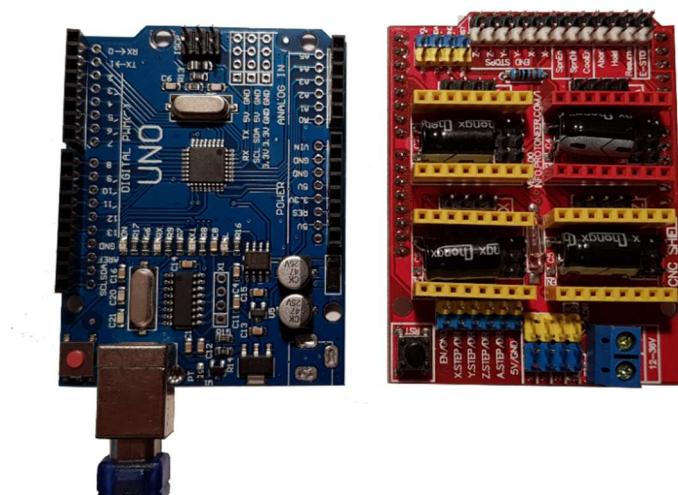
Řízení CNC stroje pomocí microcontrolleru* je vhodné pro menší, jednodušší stroje, kde se s výhodou uplatní malé rozměry, nízká cena a mnohdy velké možnosti přizpůsobení danému projektu díky open source platformám, kdy jsou volně k dispozici zdrojové kódy, dokumentace a software. Mezi nejrozšířenější patří Grbl, využívající Arduino microcontroller s nástavbou zvanou Grbl shield. TinyG microcontroller je odnoží Grbl, využívající vlastní hardware a umožňující řídit až 6 os. Grbl a TinyG využívají open source licence. Třetím, často používaným je PlanetCNC microcontroller, umožňující řídit až 4 osy. Výrobce používá vlastní software a hardware, jehož zdrojové kódy a plány nejsou volně dostupné [27].

Princip ovládání je založen na použití počítače (s OS Windows, Mac a díky USB rozhraní podpora i Android zařízení) pro odesílání G – kódu do microcontrolleru, který se stará o zpracování signálu pro krokové motory a ovládání dalších periférií. Řízení pomocí microcontrollerů je poměrně nové rozvíjející se odvětví, s velkým potenciálem pro rozvoj funkcionality díky pokrokům ve vývoji softwaru.

*Microcontroller – integrovaný obvod využívající mikroprocesor pro řízení jednoduchých operací.

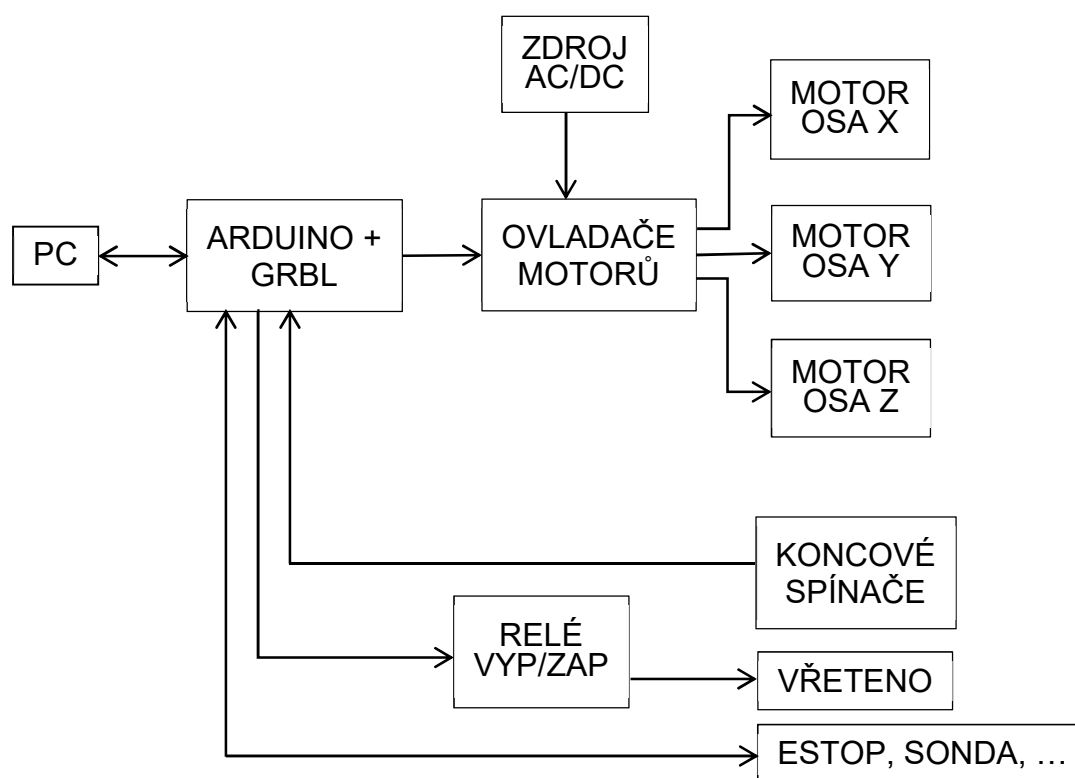
4.1 Volba řídicí elektroniky

Pro řízení byl zvolen microcontroller Uno s nastavbou Grbl Shield viz obrázek 27, který umožňuje řídit 3 osy.



Obrázek 27 microcontroller UNO s nastavbou Grbl Shield.

Microcontroller není vybaven vlastním uživatelským prostředím, ale je připojen k PC, které zastává tuto funkci. Microcontroller se pouze stará o řízení ovladačů příslušných krokových motorů a o správu vstupů a výstupů, jako jsou koncové spínače, ovládání chladicí kapaliny, spínání vřetene a podobně. To vše probíhá v souladu se vstupním G – kódem. Tato elektronika neumožňuje automatickou výměnu nástrojů. Softwarové ovládání otáček vřetene je možné, ale vyžaduje použití dražších typů vřeten a frekvenčních měničů. Blokové schéma stolní CNC frézky – viz obr. 28.



Obrázek 28 Blokové schéma stolní CNC frézky.

Grbl i TinyG jsou open source platformy. Z hlediska možnosti přidání 4 – té osy je vhodnější použít TinyG. Rozhodujícím parametrem u Grbl je možnost využití externě připojených ovladačů krokových motorů, a tudíž možnost použít výkonnější krokové motory, na rozdíl od TinyG, kde jsou ovladače integrovány přímo v microcontrolleru. Tyto ovladače (TI DRV8818) zvládnou maximální výstupní proud 2,5 A, což je dostatečné pro použití s krokovými motory Nema 17, ne však s Nema 23 a vyšší. Počítá se s využitím krokových motorů Nema 23 se jmenovitým proudem až 3 A na jedno vinutí [27].

Výhledově by bylo možné použití platformy TinyG s nutností modifikace microcontrolleru pro použití externích ovladačů krokových motorů.

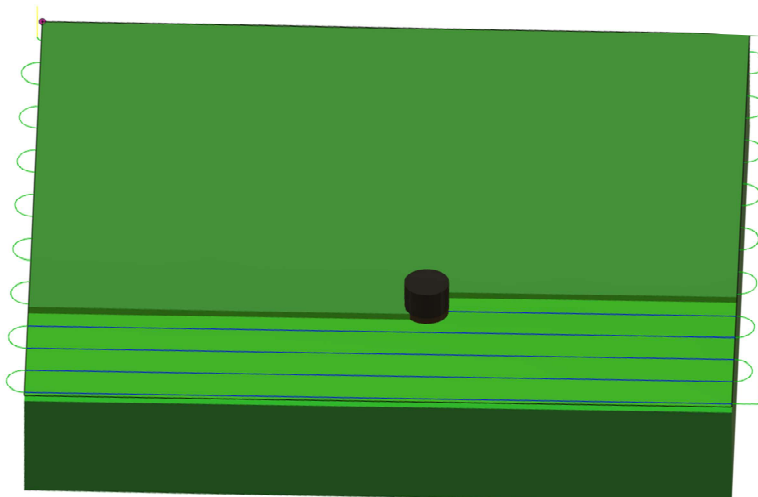
Pro řízení krokových motorů byly prodejcem doporučeny ovladače označené jako TB6600 s maximálním dlouhodobým výstupním proudem 3,5 A, které se při testování projevily jako nedostatečné. Při vyšší zátěži se přehřívaly a docházelo k jejich odstavování tepelnou ochranou. Z toho důvodu je použito ovladačů DM542 s maximálním dlouhodobým výstupním proudem 4,2 A. Ovladače DM542 jsou dlouhodobě testovány a neprojevují žádné známky přehřívání. Zapojení microcontrolleru a ovladačů znázorňuje schéma v příloze číslo 26.

4.2 Volba krokových motorů

Pohony mohou být realizovány pomocí krokových motorů nebo servomotorů. Výhodou krokových motorů je jednodušší ovládání. Poskytují větší krouticí moment při menších otáčkách a nezanedbatelnou výhodou je příznivější cena. Navzdory tomu se u velkých CNC strojů více používají servomotory, které dosahují většího krouticího momentu při vyšších otáčkách. Servomotory mají také mnohem vyšší účinnost (80 – 90 %) a dokáží krátkodobě poskytnout až dvojnásobek deklarovaného krouticího momentu. Mezi jejich výhody lze také připočítat tichý chod. Nicméně řízení servomotorů je složitější a pro provoz je nutné použít zpětnou vazbu, jako lineární nebo rotační enkodér. Současně pro použití při nižších rychlostech musí být osazeny převodovkou. I bez započtení ceny těchto dodatečných prvků je cena samotného servomotoru vyšší než u krokového motoru [28].

Malé stolní CNC frézky nedosahují takových rychlostí a zrychlení, aby bylo výhodné osadit je servomotory. Proto se využívá krokových motorů.

Důležitým parametrem při volbě krokového motoru je krouticí moment, kterého je schopen dosáhnout. Pro výpočet potřebného krouticího momentu je nutno znát posuvovou sílu při obrábění. Pro výpočet posuvové síly bylo zvoleno obrábění čela dubového polotovaru dvoubřitou frézou průměru 19 mm při hloubce záběru 3 mm a 15 000 otáčkách vřetene. Simulace znázorňuje průběh obrábění – viz obrázek 29. Programování, simulace a generování G – kódu pro obrábění je prováděno v softwaru Fusion 360.



Obrázek 29 Znázornění vygenerovaných drah.

Parametry obrábění:

$D = 19 \text{ mm}$

průměr nástroje

$z = 2$

počet břitů

$n = 15\,000 \text{ min}^{-1}$

otáčky

$v_f = 1\,500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

posuvová rychlost

$a_p = 3 \text{ mm}$

hloubka záběru

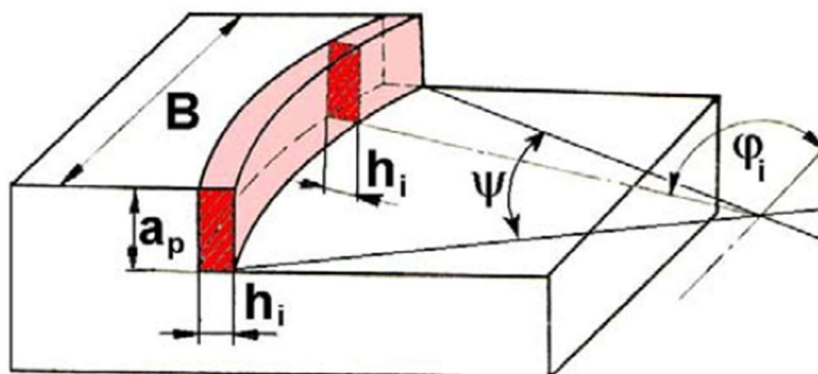
$f_z = 0,05 \text{ mm}$

posuv na zub

$f_n = 0,1 \text{ mm}$

posuv na otáčku

Jmenovitý průřez třísky obr. 30, vztah (4.1), (4.2) [29]:



Obrázek 30 Průřez třísky při čelním frézování [29].

$$h_i = \frac{f_n}{z} \text{ [mm]} \quad (4.1)$$

$h_i \text{ [mm]}$ tloušťka odřezávané třísky

$f_n \text{ [mm]}$ posuv na otáčku = 0,1 mm

$z [-]$ počet břitů nástroje = 2

$$h_i = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ mm}$$

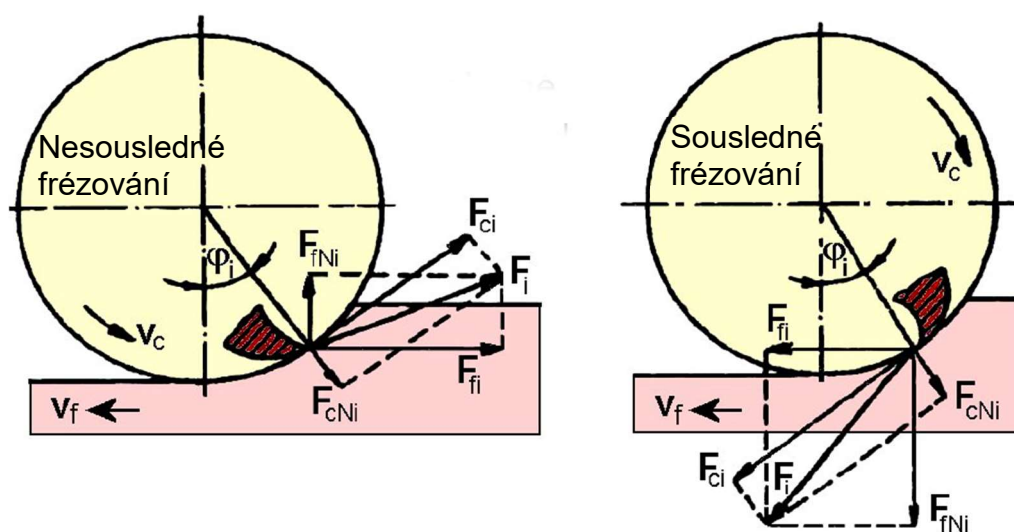
$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.2)$$

A_{Di} [mm²] jmenovitý průřez třísky
 a_p [mm] hloubka záběru = 3 mm
 h_i [mm] tloušťka odřezávané třísky = 0,05 mm
 $A_{Di} = 3 \cdot 0,05 = 0,15 \text{ mm}^2$

Pozn.: se zmenšující se tloušťkou třísky měrný řezný odpor roste [29].

Úhel posuvového pohybu dle vztahu (4.3) [29]:

Schematicky znázorněno v obr. 31.



F_i - celková řezná síla, F_{ci} - řezná síla, F_{cNi} - kolmá řezná síla,
 F_{fi} - posuvová síla, F_{fNi} - kolmá posuvová síla

Obrázek 31 Řezné síly na zubu válcové frézy v pracovní rovině Pfe [29].

$$\sin \varphi_{\max} = \frac{2}{D} \sqrt{D \cdot H - H^2} \text{ [-]} \quad (4.3)$$

φ_{\max} [°] maximální úhel posuvového pohybu
 D [mm] průměr nástroje = 19 mm
 H [mm] šířka záběru = 19 mm

$$\sin \varphi_{\max} = \frac{2}{19} \sqrt{19 \cdot 19 - 19^2} = 0 \rightarrow \varphi_{\max} = 0^\circ$$

Měrný řezný odpor dřeva dle vztahu (4.4) [34]:

$$k_{Ci} = k_{BOR} \cdot k_d \cdot k_v \cdot k_w \cdot k_p \cdot k_h \text{ [MPa]} \quad (4.4)$$

k_{BOR} [N · mm⁻²] měrný řezný odpor dřeva (v příloze č. 1 tab. 1)
 k_d [-] koeficient dřeviny (v příloze č. 1 tab. 2)
 k_v [-] koeficient řezné rychlosti (v příloze č. 1 tab. 3)
 k_h [-] koeficient vlivu hloubky třísky (v příloze č. 1 tab. 4)
 k_w [-] koeficient vlhkosti (v příloze č. 1 tab. 5)
 k_p [-] koeficient otupení ostří (v příloze č. 1 tab. 6)

$$k_{Ci} = 53 \cdot 1,55 \cdot 3,5 \cdot 1 \cdot 1,1 = 306 \text{ MPa}$$

Řezná síla dle vztahu (4.5) [29]:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} \text{ [N]} \quad (4.5)$$

F_{ci} [N] řezná síla

k_{ci} [N] měrný řezný odpor = 306 MPa

$$F_{ci} = 306 \cdot 0,3 = 91,8 \text{ N}$$

Posuvová síla dle vztahu (4.6) [28]:

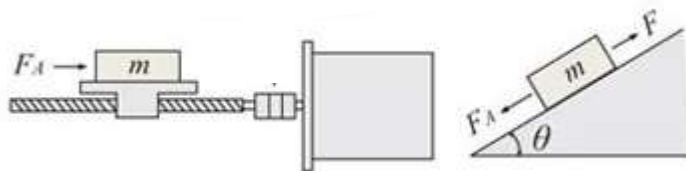
$$F_{fi} = \cos \varphi_{max} \cdot F_{ci} \text{ [N]} \quad (4.6)$$

F_{fi} [N] posuvová síla

$$F_{fi} = \cos 0 \cdot 91,8 = 91,8 \text{ N}$$

Síla ve směru pohybu dle vztahu (4.7) [30]:

Schematicky znázorněno v obr. 32.



Obrázek 32 Schéma zatížení krokového motoru [30].

$$F = F_A + m \cdot g(\sin\theta + \mu \cdot \cos\theta) \text{ [N]} \quad (4.7)$$

F [N] síla ve směru pohybu

F_A [N] síla působící proti pohybu = $F_{fi} = 91,8 \text{ N}$

μ [–] třecí součinitel nakloněného povrchu

g [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] tíhové zrychlení

m [kg] hmotnost pohybující se soustavy

θ [°] úhel náklonu

Nejedná se o pohyb po nakloněné rovině, proto lze zjednodušit na:

$$F = F_A \text{ [N]} \quad (4.8)$$

$$F = 91,8 \text{ N}$$

Krouticí moment motoru dle vztahu (4.9) [30]:

$$M_K = \frac{F \cdot P_B}{2 \cdot \pi \cdot \eta} + \frac{\mu_o \cdot F_o \cdot P_B}{2 \cdot \pi} [N \cdot mm] \quad (4.9)$$

M_K [Nm]	<i>krouticí moment</i>
F_o [N]	<i>předpětí matice</i> $= \frac{1}{3} F = \frac{1}{3} \cdot 91,8 \text{ N}$
μ_o [–]	<i>součinitel tření v matici</i> $= 0,44$ [26]
P_B [mm]	<i>stoupání závitu</i> $= 3 \text{ mm}$
η [–]	<i>účinnost šroubového převodu (trapézový 0,65)</i> [31]

$$M_K = \frac{91,8 \cdot 3}{2 \cdot \pi \cdot 0,6} + \frac{0,44 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 91,8\right) \cdot 3}{2 \cdot \pi} = 79,5 \text{ N} \cdot \text{mm} \rightarrow 0,08 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Při volbě krokových motorů bylo vycházeno z informací dostupných v dokumentacích výrobců. K dispozici je celá řada výkonů, velikostí a variant přírub. Voleno bylo mezi krokovými motory typu Nema 17 a 23. Zvolený výrobce uvádí pouze tzv. „holding torque“, což je moment, který je motor schopen udržet, když jsou současně napájeny obě cívky, aniž by se protočil. Výrobce poskytuje momentové charakteristiky pro Nema 17 – viz příloha č. 2 i pro Nema 23 – viz příloha č. 3.

Cílem je dosažení posuvové rychlosti $4000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Tudíž, pro krokový motor s 1,8stupňovým krokem, připojený na jednoduchý šroubový převod se stoupáním 3 mm je nutno dosáhnout frekvence 8889 kroků za sekundu. Z charakteristiky v příloze č. 2 je zřejmé, že dosáhnout krouticího momentu 0,08 Nm při frekvenci 8889 kroků za sekundu je u motoru Nema 17 na hranici momentové charakteristiky a lépe se hodí použít motor Nema 23 [32].

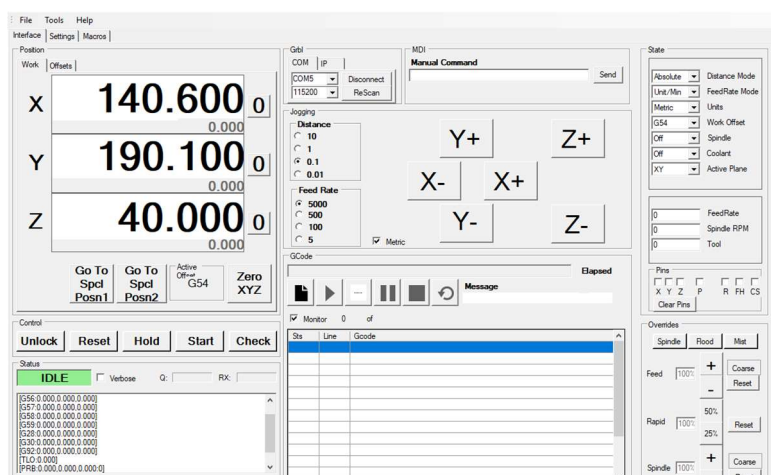
Oba motory byly i v reálu testovány a zkoušky potvrdily závěry zjištěné výpočtem. Z testování vyplynulo, že krokový motor Nema 23 svou charakteristikou lépe odpovídá koncepci stroje a požadovaným parametrům. Je schopen dlouhodobého provozu, na rozdíl od Nema 17, u kterého občas docházelo k vynechávání kroků i při malých posuvových rychlostech. Díky nevelkému cenovému rozdílu byl pro použití zvolen krokový motor Nema 23 (cenový rozdíl cca 30 %). Konkrétně byl zvolen bipolární krokový motor Nema 23 HS200 2231 s 1,8stupňovým krokem. Celá charakteristika Nema 23 – viz příloha č. 3.

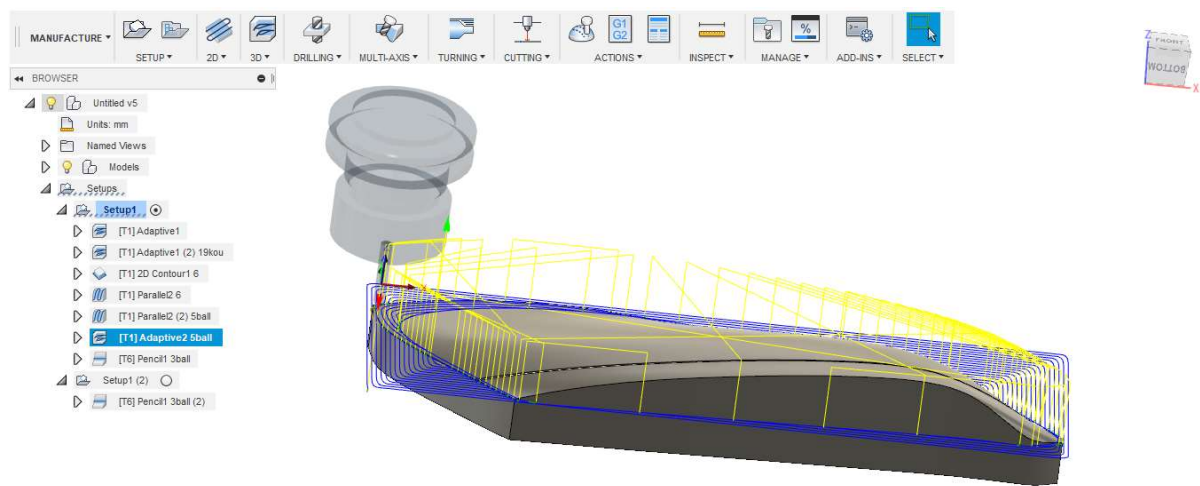
4.3 Grbl firmware specifikace

Pro řízení arduino microcontrolleru je použit řídicí firmware Grbl. Software je napsaný v jazyce C a je schopný dosáhnout frekvence ovládacích pulsů 30 kHz. Vstupními informacemi je standardní G – kód s podporou obloukových, kruhových i šroubových interpolací. Nejsou podporovány makra. Grbl firmware zvládá přečíst až 16 pohybů dopředu a naplánovat optimální akcelerace a rychlosti pro plynulý průjezd dané trajektorie [33].

4.4 Kompatibilní software

Díky open source licenci pro Grbl platformu je k dispozici několik softwarů pro zasílání G – kódu do microcontrolleru používajícího Grbl firmware. Mezi nejoblíbenější patří Universal G – Code Sender a Grbl – Panel. Jako uživatelské rozhraní byl zvolen Grbl Panel – viz obr. 33. Jeho výhodou je snadná instalace, dobrá kompatibilita, a ještě do nedávné doby časté aktualizace a nová vylepšení. Software umožňuje ruční pojíždění, definování několika polotovarů současně, zrychlení a zpomalení spuštěného programu, pauzu a změnu otáček vřetene během probíhajícího programu, je-li podporována vřetenem. Lze použít metrický i imperiální systém. Hlavním nedostatkem je absence knihovny používaných nástrojů a s tím spojená absence automatické kompenzace délky nástroje. Bohužel touto funkcí nedisponuje žádný z doposud testovaných softwarů pro zasílání G – kódu.





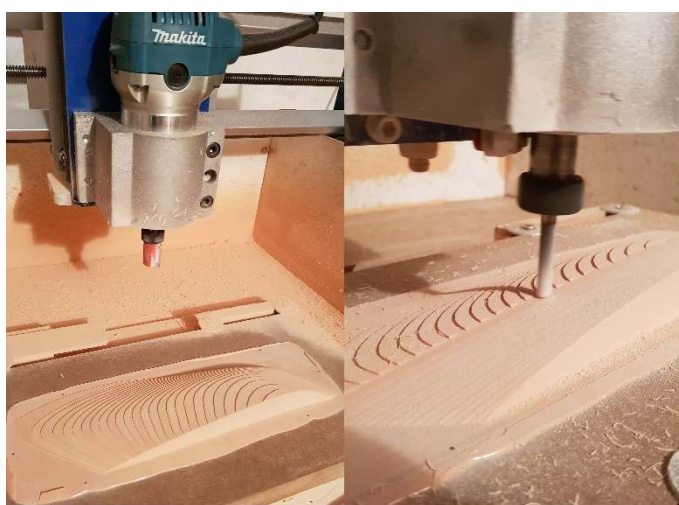
Obrázek 34 Uživatelské rozhraní CAM modulu v programu Fusion 360.

5 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI FRÉZKY

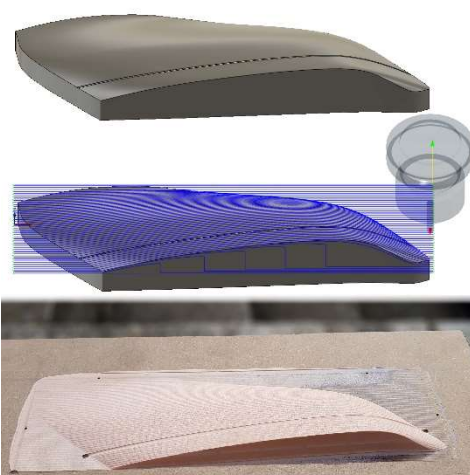
Funkčnost frézky je testována na prototypu používajícím zjednodušené lineární vedení popisované v kapitole 3.4. Na stroji bylo testováno několik materiálů, jako tvrdá i měkká dřeva, překližka, Sika block M450 (umělé dřevo), polycarbonát, ABS, hliníkové slitiny a mosaz.

Jedním z testovaných vzorků byly obrobky Sika block, ze kterých byly frézovány formy na laminování karbonových dílů sání vzduchu pro studentskou formuli TU Brno Racing – viz obr. 35. Jedná se o 3D součást obráběnou 3D adaptivními a paralelními strategiemi.

Ukázka takové strategie – viz obr. 36 a parametry obrábění v tabulce 12.



Obrázek 35 Ukázka obrábění.



Obrázek 36 Model – CAM – výrobek.

Tabulka 12 Parametry obrábění.

Název symbolu	Symbol	Hrubování	Dokončování
Průměr nástroje	D [mm]	19	5 kulová
Počet břitů	z [-]	2	2
Otáčky vřetene	n [min ⁻¹]	15 000	24 000
Posuvová rychlost	v _f [mm.min ⁻¹]	1 500	2 000
Hloubka záběru	a _p [mm]	4	0,5 (1,5 mm krok)
Strojní čas	t _s [min]	15,5	9,5

Další testovaný vzorek bylo frézování hliníkových držáků určených pro montáž lichoběžníkových rovnoramenných předepjatých matic. Jedná se o identické držáky, jako jsou použity na navrhovaném stroji. Jako polotovar byl použit L profil 30x30x5 mm z hliníkové slitiny EN AW 6063. Součásti byly obráběny ze dvou stran, proto bylo v průběhu nutné jejich otočení. Ukázka umístění svěráku v prostoru frézky – viz obrázek 37.



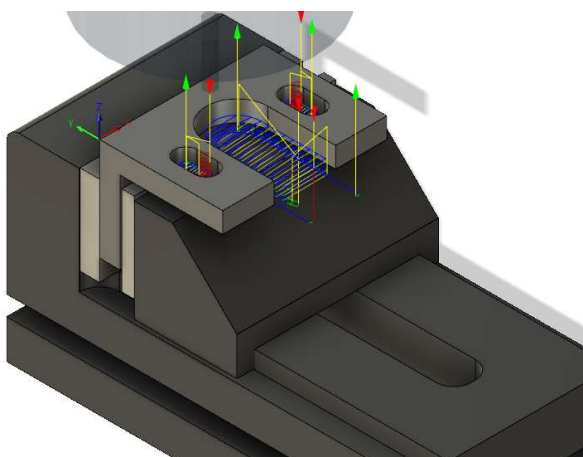
Obrázek 37 Umístění svěráku v prostoru frézky.

Součást byla hrubována pomocí 2D adaptivní strategie s radiálním přídkem a dokončena pomocí konturovací strategie. Znázornění drah nástroje vygenerovaných v softwaru Fusion 360 – viz obr. 38. Parametry obrábění – viz tabulka 13.

Strojní čas pro hrubování lze zkrátit použitím nástroje o větším průměru. Vzhledem k časově náročné ruční výměně nástroje a nutnosti následně vynulovat délku nového nástroje, bylo však přistoupeno k použití jednoho nástroje na všechny operace.

Tabulka 13 Parametry obrábění.

Název symbolu	Symbol	Hrubování	Dokončování
Průměr nástroje	D [mm]	3	3
Počet břitů	z [-]	3	3
Otáčky vřetene	n [min ⁻¹]	10 000	15 000
Posuvová rychlost	v _f [mm/min]	100	100
Hloubka záběru	a _p [mm]	2 adaptivní	0,5 kontura
Strojní čas	t _s [min]	12,2	1,1

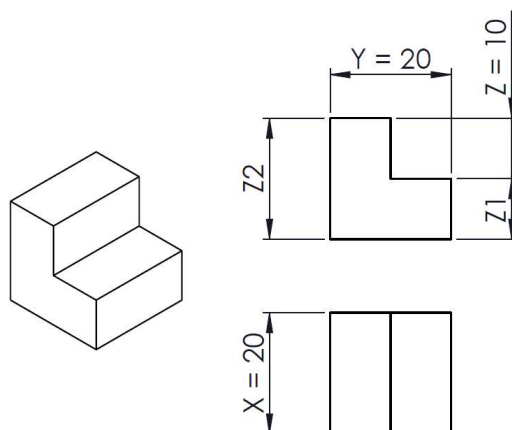


Obrázek 38 Simulace obrábění součásti.

V průběhu testování byla zjištěna nutnost zakrytování stroje – viz obr. 37. Zejména při obrábění dřevěných materiálů docházelo k rozptýlu třísek po okolí stroje. Zakrytování je provedeno z polykarbonátových tabulí doplněných o přilepené magnety. Magnety drží tabule na místě, ale v případě potřeby, například při obrábění polotovaru většího než pracovní prostor stroje, je možné je rychle odejmout.

5.1 Experimentální měření opakovatelnosti stroje

Byl navržen a proveden experiment s cílem zjištění opakovatelnosti stroje. Opakovatelnost je vlastnost, udávající, s jakou přesností je stroj schopný opakovaně urazit stejnou vzdálenost a tím pádem obrobít stejný rozměr. Principem experimentu byla výroba 10 stejných dílů – viz obr. 39, na kterých se následně měřily rozměry x, y a z. Každý rozměr zastupuje příslušnou osu. Z naměřených rozměrů jsou vypočteny odchýlení od požadovaného rozměru a průměrné odchýlení rozměrů pro každou osu. Dále je zjištěna směrodatná odchylka vypočtených hodnot. Následně pomocí funkce NORMDIST (software Microsoft Excel), určené pro zjištění hustoty normálního rozložení, byla zjištěna hustota normálního rozložení odchýlení rozměru pro všechny osy obráběcího stroje a vynesena do grafu – viz obr. 40.



Obrázek 39 Rozměry dílu pro experiment.

Pro měření byl použit mikrometr s rozlišitelností 0,01 mm. Rozměr 'z' není možno tímto měřidlem naměřit. Rozměry 'z1' a 'z2' nejsou z důvodu vnesené chyby při otočení dílu pro obrobení spodní strany dostatečně relevantní. Rozměr 'z' byl získán rozdílem délek 'z1' a 'z2', které jsou obě ovlivněny stejnou chybou způsobenou přeupnutím. Hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 14. Následně rozdílem požadovaného rozměru a naměřeného rozměru bylo zjištěno odchýlení pro každý měřený rozměr.

Tabulka 14 Naměřené hodnoty.

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x [mm]	19,92	19,95	20,01	19,93	19,96	19,92	19,95	19,96	19,92	19,99
y [mm]	19,99	19,94	19,98	20	19,96	19,92	19,97	19,95	19,97	19,99
z [mm]	9,94	9,99	9,97	10,04	10,08	10,01	9,99	10,06	10,01	10,03

Aritmetický průměr měřených hodnot (5.1) [36]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \text{ [mm]} \quad (5.1)$$

n [–] počet měření

\bar{x} [mm] aritmetický průměr hodnot x_i

\bar{y} [mm] aritmetický průměr hodnot y_i

\bar{z} [mm] aritmetický průměr hodnot z_i

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \cdot (19,92 + \dots + 19,99) = 19,951 \text{ mm}$$

$$\bar{y} = 19,967 \text{ mm}$$

$$\bar{z} = 10,012 \text{ mm}$$

Směrodatná odchylka hodnot odchýlení rozměru pro osy X, Y a Z (5.2) [36]:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \text{ [mm]} \quad (5.2)$$

σ_x [mm] směrodatná odchylka pro hodnotu odchýlení rozměru x

σ_y [mm] směrodatná odchylka pro hodnotu odchýlení rozměru y

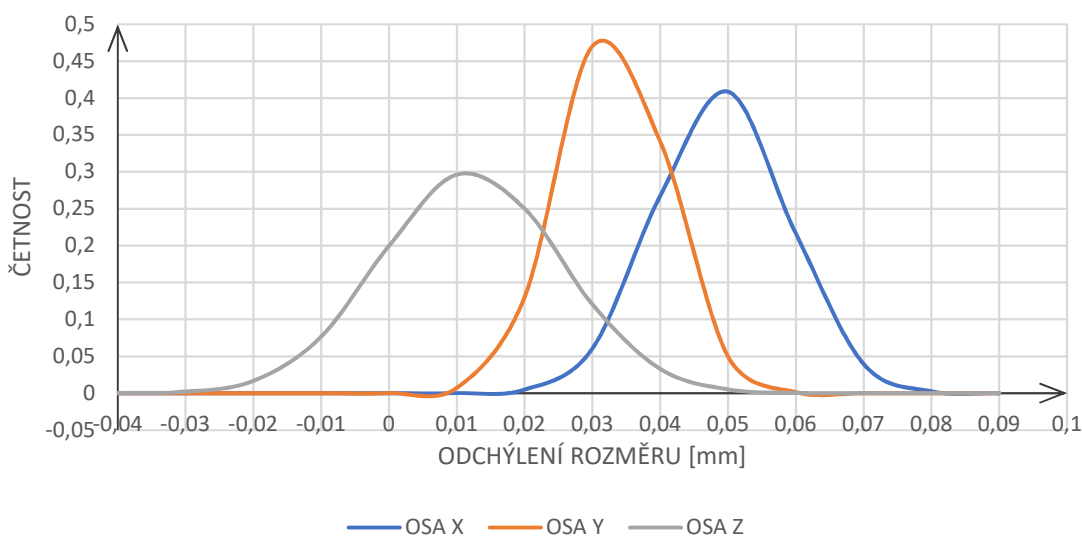
σ_z [mm] směrodatná odchylka pro hodnotu odchýlení rozměru z

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10-1)} \cdot \sum_{i=1}^{10} (x_i - 19,951)^2} = 0,00971 \text{ mm}$$

$$\sigma_y = 0,00790 \text{ mm}$$

$$\sigma_z = 0,01332 \text{ mm}$$

HUSTOTA NORMÁLNÍHO ROZLOŽENÍ ODCHÝLENÍ ROZMĚRU



Obrázek 40 Graf hustoty normálního odchýlení rozměrů.

Jednotlivé křivky hustoty normálního rozložení (také nazývaného Gaussovo rozložení) znázorňují opakovatelnost dané osy stroje. V místě maxima funkce se nachází střední hodnota její proměnné. Proměnná je v tomto případě velikost odchýlení naměřeného od požadovaného rozměru.

S rostoucí směrodatnou odchylkou ' σ ' se křivka rozšiřuje. Rozšiřující se křivka znamená rostoucí rozptyl hodnot a tím pádem klesající opakovatelnost stroje [36].

Vykreslení odchýlení všech tří měřených os do jednoho grafu ukazuje rozdíly v opakovatelnosti daných os. Z porovnání je patrné, že nejhorší opakovatelnosti je dosahováno na ose Z. Osa Z je tedy nejslabším článkem. Necht' je tedy považována za prvek udávající celkovou opakovatelnost stroje. Gaussova křivka říká, že v rozsahu $\pm 3\sigma$ se nachází 99,7 % všech hodnot, viz obr. (41). 99,7 % (6σ) je hodnota, která je pro požadovanou aplikaci více než dostatečná. Na základě výpočtu (5.3) lze stanovit opakovatelnost stroje na $\pm 0,08$ mm. Nutno však brát ohled na primární určení stroje pro obrábění dřeva, které bylo použito i jako materiál vyráběných vzorků. Jedná se o nehomogenní materiál s odlišnými mechanickými vlastnostmi v různých směrech.

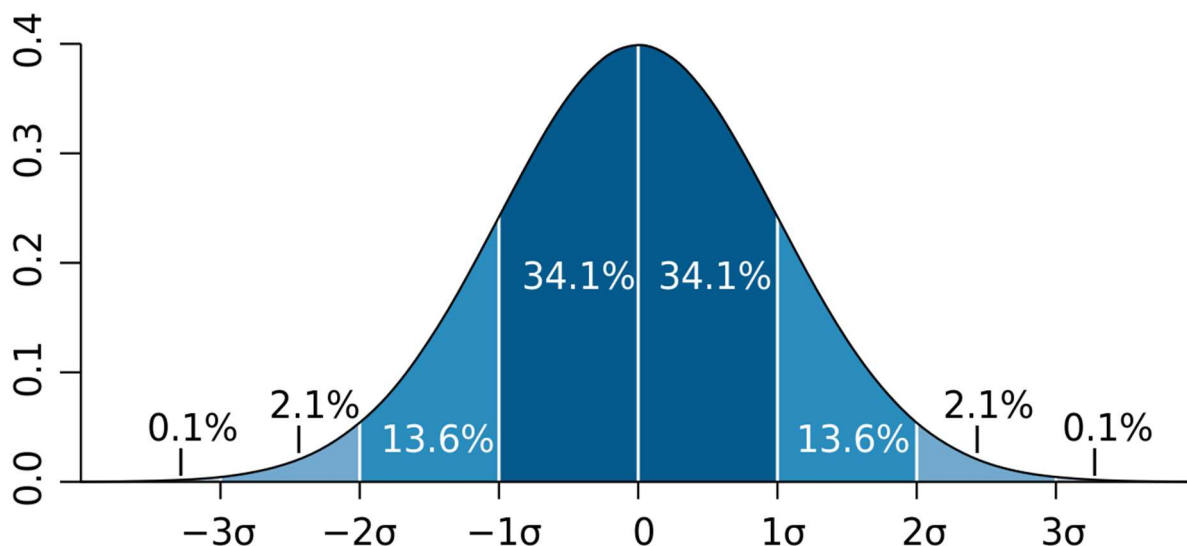
Směrodatná odchylka stroje (5.3):

$$\sigma_S = 6 \cdot \sigma_z [\text{mm}] \quad (5.3)$$

σ_z [mm] směrodatná odchylka pro hodnotu odchýlení rozměru z

σ_S [mm] směrodatná odchylka stroje

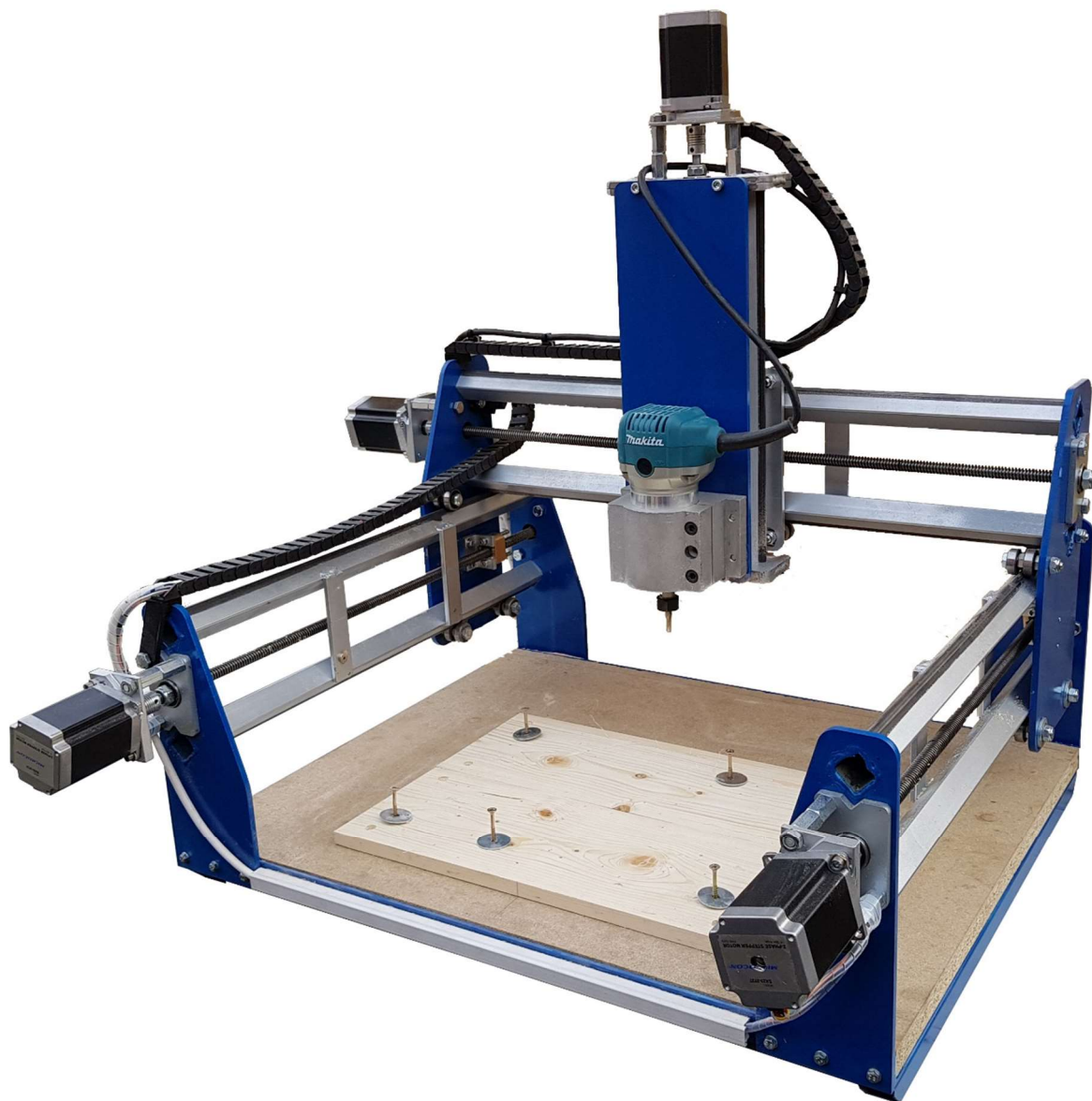
$$\sigma_S = 6 \cdot 0,01332 = 0,07992 \text{ mm} \cong 0,08 \text{ mm}$$



Obrázek 41 Hustota normálního rozdělení pravděpodobnosti [37].

6 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V době psaní bakalářské práce byl dokončený stroj – viz obr. 42 navržený za účelem testování, využívajícího zjednodušeného lineárního vedení, popsany v předchozích kapitolách.



Obrázek 42 Navržený a vyrobený testovací stroj.

6.1 Technické zhodnocení

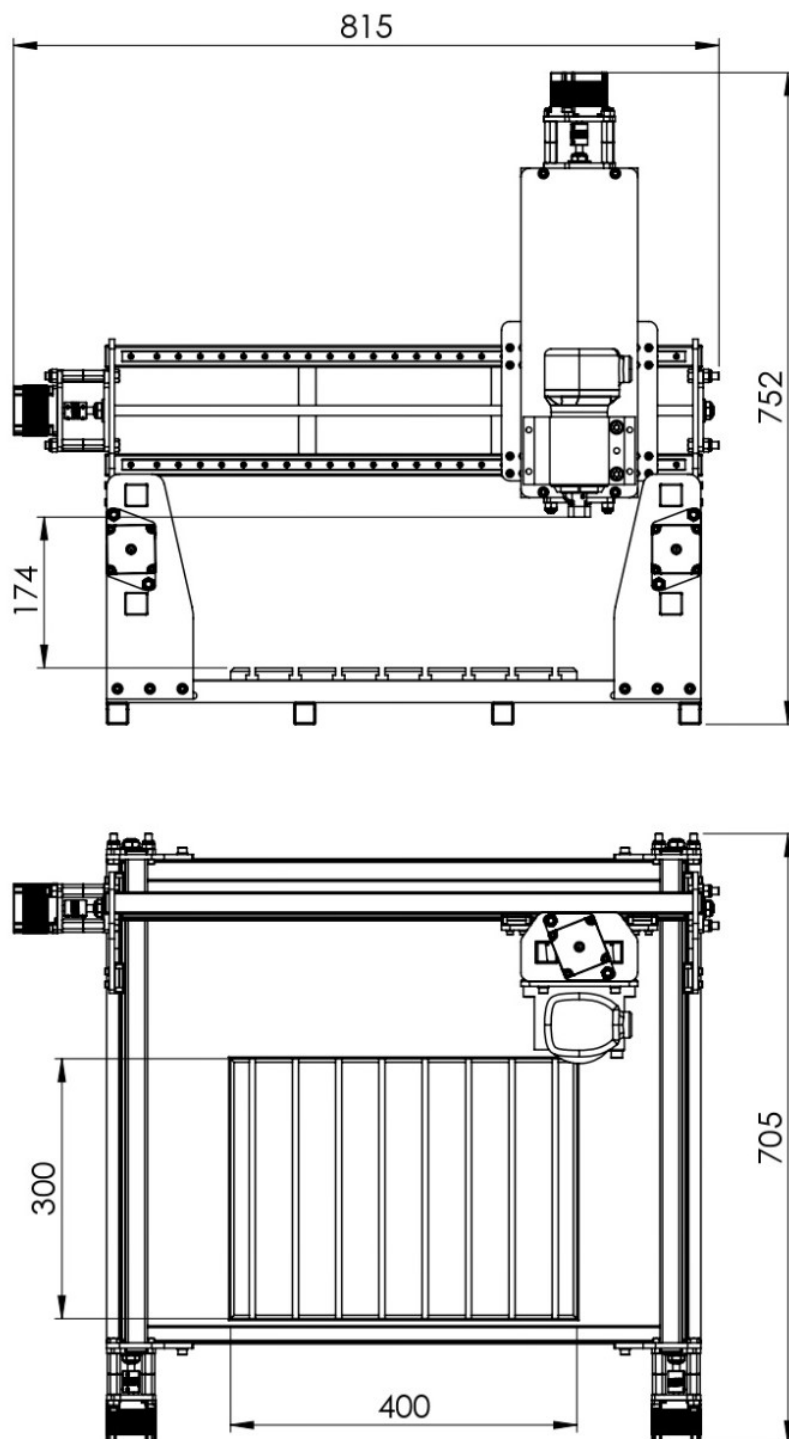
Stroj je osazen krokovými motory Nema 23. K převodu rotačního pohybu na lineární jsou využity lichoběžníkové rovnoramenné pohybové šrouby spojené s krokovými motory. Jako vřeteno je použito vysokootáčkové vřeteno Makita RT0700C.

Na vyrobeném stroji bylo testováno obrábění dřeva, materiálu určeného pro výrobu forem SikaBlock, který je svými vlastnostmi podobný dřevu, plastové materiály jako ABS a PC. Mimo zmíněné materiály bylo experimentálně zkoušeno obrábění neželezných kovů (mosaz a slitiny hliníku). Stroj nebyl navrhován za účelem obrábění neželezných kovů a zmíněné testování bylo provedeno pouze pro zajímavost. Navzdory tomu byly výsledky obrábění uspokojivé.

Parametry stroje – viz tabulka 15 a 16, rozměry stroje – viz obrázek 43.

Tabulka 15 Parametry stroje.

Hmotnost:	63,4 kg
Obrobitelný prostor (X, Y, Z):	400 x 300 x 170 mm
Půdorys (Š, D):	815 x 705 mm
Max. rychlost posuvu (X, Y, Z):	4000, 4000, 4000 mm.min ⁻¹
Opakovatelnost stroje:	± 0,08 mm



Obrázek 43 rozměry stroje.

Tabulka 16 Parametry stroje.

Elektronika:	Arduino Uno s Grbl Shield připojené k PC přes USB
Příkon:	360 W (bez vřetene), 1070 W (s vřetenem)
Vřeteno:	Makita RT0700C (710 W, 10 000 – 30 000 min ⁻¹) Změna otáček pomocí ručního potenciometru max. průměr stopky pro upnutí nástroje = 8 mm
Přenos krouticího momentu:	X, Y, Z – lichoběžníkové rovnoramenné šrouby + matice s možností vymezení vůle
Krokové motory:	NEMA 23 bez zpětné vazby
Rám:	svařovaný z ocelových tenkostěnných profilů a ocelových výpalků
Stůl:	MDF deska vsazená v ocelovém rámu s možností výměny za hliníkový stůl s T – drážkami

6.1.1 Návrhy na vylepšení

Testováním byla zjištěna vysoká hluchost stroje. Zejména při obrábění tvrdého dřeva je téměř nezbytné použití ochrany sluchu. Z toho důvodu je zamýšleno doplnění stroje o krytování, plnicí současně i funkci odhlučnění. Motor vřetene je vybaven intenzivním chlazením, jehož výstup je směřovaný směrem k nástroji a proud vzduchu současně napomáhá odvodu třísek. Nevýhodou tohoto řešení je víření třísek v pracovním prostoru stroje. Pro odsávání třísek je nutno doplnit stroj odsáváním napojeným na průmyslový vysavač s cyklónovým separátorem. Použití přímého odsávání se obvykle realizuje pomocí hubice osazené kartáčem pro lepší kopírování obráběného povrchu. Nedostatkem takového zařízení je znemožnění vizuální kontroly nástroje během obrábění. Dalším plánovaným vylepšením je doplnění o snímač pro měření délky nástroje. Ten funguje na principu koncového spínače, jehož využití umožňuje jak zvolená elektronika, tak řídicí software.

Primární určení stroje je pro obrábění dřeva, navzdory tomu bylo za účelem otestování jeho možností zkoušeno obrábění barevných kovů, jako různé slitiny hliníku mosaz a bronz. Při dostatečném přizpůsobení řezných podmínek a přimazávání nástroje zvládal stroj obrábět i tyto materiály. Aplikace řezného oleje do místa řezu má za následek zhoršení odvodu třísek. V případě využití pro obrábění barevných kovů je vhodné doplnit stroj o nádrž s čerpadlem pro použití řezné emulze, napomáhající zlepšení řezných podmínek.

6.2 Ekonomické zhodnocení

Ekonomická část zhodnocení porovnává obě navrhované varianty, tedy jak testovací prototyp, tak finální řešení. Hlavní výhodou prototypu je v tomto případě nízká cena viz tabulka nákladů 17, navzdory které dokáže pro testovací účely plně zastoupit konečný produkt. Samozřejmě nižší cena je kompenzována použitím náhrady lineárního vedení pomocí vlastní konstrukce rámu a z toho plynoucí nižší přesnost. V tabulce 17 a 18 jsou uvedeny ceny nakupovaných i vyráběných dílů vlastní konstrukce stroje. Nejsou zde uvedeny ceny dílů pro sestavení řídicí elektroniky. U vyráběných dílů je uvedena pouze pořizovací cena polotovaru na uvedený díl.

Tabulka 17 Náklady na testovací prototyp.

Díl	Počet ks	Kč/ks	Kč celkem	Poznámky
Výpalky	1	1 528	1 528	
Hutní materiál	1	250	250	
Ložisko 628 2RS	32	16	512	
Ložisko 6000 2RS	8	30	240	
Tyč tr 12x3	4	84	336	
Předepjatá matice tr 12x3	4	125	500	D 36 mm, 1 000 mm = 2 580 Kč
Držák matice	4	4	16	1 000 mm = 120 Kč
MDF deska stolu	1	115	115	
Kabeláž	1	250	250	
Arduino UNO	1	71	71	
Grbl shield	1	40	40	
Driver krok. Motoru	3	360	1 080	
Krokový motor Nema 23	4	632	2 400	
Spojka krok. Motoru	4	25	100	6,35 mm x 8 mm
Spojovací materiál	1	250	250	
Vřeteno Makita	1	2 650	2 650	Makita rt0700c
Držák vřetene 65 mm	1	460	460	
Energetický řetěz	2	88	176	
Chráníčka kabelů	1	100	100	
Σ			11 980	

Finální návrh konstrukce (tabulka 18) je navíc rozšířen o kalené lineární vedení montované na svařený rám stroje. Kalené lineární vedení značně ovlivní konečné náklady na výrobu stroje. Použití takového vedení je však pro dlouhodobý provoz, přesnost a životnost stroje nezbytné. Současně je v tomto návrhu uvažováno i s využitím stolu z Al slitiny.

Tabulka 18 Náklady na finální řešení stroje.

Díl	Počet ks	Kč/ks	Kč celkem	Poznámky
Výpalky	1	1528	1528	
Hutní materiál	1	250	250	
Lineární kolejnice osa X	2	750	1500	MGN12 x 650
Lineární kolejnice osa Y	2	548	1096	MGN12 x 550
Lineární kolejnice osa Z	2	390	780	MGN12 x 350
Lineární vozíky	12	132	1584	MGN12C
Ložisko 6000 2RS	8	30	240	
Tyč tr 12x3	4	84	336	
Předepjatá matice tr12x3	4	125	500	D 36 mm, 1000 mm = 2580 Kč
Držák matice	4	4	16	1000 mm = 120 Kč
MDF deska stolu	1	115	115	
Al deska stolu	1	3420	3420	20 mm, EN AW 6082
Kabeláž	1	250	250	
Arduino UNO	1	71	71	

Grbl shield	1	40	40	
Driver krok. Motoru	3	360	1080	
Krokový motor Nema 23	4	600	2400	
Spojka krok. Motoru	4	25	100	6,35 mm x 8 mm
Spojovací materiál	1	320	320	
Vřeteno Makita	1	2650	2650	Makita rt0700c
Držák vřetene 65 mm	1	460	460	
Energetický řetěz	2	88	176	
Chránička kabelů	1	100	100	
Σ Al stůl			18 897	
Σ MDF stůl			15 592	

ZÁVĚR

Zadáním této bakalářské práce je návrh, výroba a montáž modelářské CNC frézky. Požadovanými parametry stroje jsou zadane rozměry obrobiteľného prostoru 300 x 400 x 100 mm a súčasne schopnosť obrábět dřevěné a plastové materiály.

Práce řeší:

Průzkum trhu ve formě přehledu strojů dostupných na trhu, popis jejich parametrů a vzájemné porovnání spolu s uvedením výhod a nevýhod. Celé tak aby bylo zabráněno co nejširší spektrum strojů. Od malých strojů pro obrábění drobných dílů, přes komplexní 5 -ti osé řešení až po stroje pro větší plošné obrábění.

Vlastní návrh zahrnuje základní nastínění konstrukce průmyslových strojů a následnou aplikaci některých poznatků na konstrukci hobby modelářského stroje. Zabývá se volbou polotovarů a jejich materiálu spolu s volbou výrobních technologií. Doplněno o jednoduchou simulaci zatížení hotového svarku. Všechny navržené součásti zaneseny ve výkresové dokumentaci v příloze.

Nedílnou součástí stroje jsou pohony a jejich řízení. Volba krokových motorů je provedena s ohledem na schopnost dosažení posuvových rychlostí 4 000 mm.min⁻¹. Výběr krokových motorů úzce souvisí s volbou použité řídicí elektroniky, která je svými parametry odpovídající nejen výkonu motorů, ale rovněž celkové koncepci stroje.

Během výroby byly prakticky otestovány navržené výrobní technologie a postupy. Zkoušeno a vyladěno bylo rovněž použití svařovacích přípravků i obrábění hotových svarků.

Vyrobený prototyp, podrobený testování, dosahuje všech požadovaných parametrů. Je schopen obrábět nejen dřevěné a plastové materiály, ale mimo to dosahoval uspokojivých výsledků i v případě zkoušky obrábění barevných kovů. Během testování byl proveden experiment s cílem zjistit opakovatelnost stroje. Ta je stanovena na ± 0,08 mm. S přihlédnutím k určení stroje pro modelářské obrábění dřeva se jedná o dostatečnou hodnotu.

Ekonomický rozbor byl proveden pro stroj osazený dřevěným a hliníkovým stolem. Vyrobený prototyp využívá dřevěného stolu. Požadavek na pořizovací náklady na materiál byl splněn v případě obou variant.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.
2. *Tool-Rank.com* [online]. 2018 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.tool-rank.com/tool-blog/contests/around-the-web/win-an-x-carve-for-your-business-201803082063/>
3. *Carbide 3D* [online]. Torrance, CA: Carbide 3D, 2018 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://carbide3d.com/nomad/>
4. *Carbide 3D* [online]. Torrance, CA: Carbide 3D, 2018 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://carbide3d.com/shapeoko/>
5. *X-Carve* [online]. Chicago, IL: Inventables, 2019 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.inventables.com/technologies/x-carve>
6. *MillRight CNC Carve King Kit Bundle* [online]. Dawson, GA: MillRight CNC, 2019 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://millrightcnc.com/product/millright-cnc-carve-king-kit-bundle/>
7. *STEPCRAFT S420 V2* [online]. Dublin, Ireland: Stoney CNC, 2015 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://stoneycnc.co.uk/stepcraft-s420-multifunctional-desktop-cnc-system/>
8. *STEPCRAFT Brochure* [online]. Iserlohn, Germany: Stepcraft, 2015 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: http://stoneycnc.co.uk/html/downloads/STEPCRAFT_Brochure.pdf
9. *The MicroMill* [online]. RP3d, 2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.rp3d.co.uk>
10. *The MicroMill - A desktop CNC milling machine* [online]. New York City: Kickstarter, 2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.kickstarter.com/projects/rp3d/the-micromill-a-desktop-cnc-milling-machine>
11. *Kluzné pouzdro iglidur* [online]. Kolín nad Rýnem: igus, 2019 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.igus.cz/info/plain-bearings-iglidur-j-material-data>
12. *Pocket NC V2-10* [online]. Bozeman, MT: PocketNC, 2015 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.pocketnc.com/pocket-nc-v2>
13. *Benchtop Standard 2424 2' x 2' CNC Machine Kit* [online]. North Bend, Washington: CNCRouterParts, 2016 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.cncrouterparts.com/benchtop-standard-2424-2-x-2-cnc-machine-kit-p-369.html>
14. *Maslow* [online]. Santa Rosa, CA, 2018 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.maslowcnc.com>
15. *Maslow CNC - a \$500 open source 4 by 8 foot CNC Machine* [online]. New York City: Kickstarter, 2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.kickstarter.com/projects/1830738289/maslow-cnc-a-500-open-source-4-by-8-foot-cnc-machi?ref=user_menu
16. *Complete Maslow kit* [online]. MaslowCNC [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://maslowcommunitygarden.org/Maslow-kits-for-sale-soon.html>
17. *Přesnost CNC stroje* [online]. FANUC Czech, 2019 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/presnost-cnc-stroje-dnes-dokaze-pracovat-i-na-nanometry/>

18. MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
19. *Profil dutý svařovaný se čtvercovým průřezem 20x2* [online]. Praha: Feron, 2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/detail/39422/profil-duty-svarovany-cerny-se-ctvercovym-prurezem-en-10219-rozmer-20x2>
20. *Profil dutý svařovaný se čtvercovým průřezem 25x3* [online]. Praha: Feron, 2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/detail/29092/profil-duty-svarovany-cerny-se-ctvercovym-prurezem-en-10219-rozmer-25x3>
21. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN isbn80-7361-033-7.
22. *Převodní tabulka značení ocelí - Portál pro strojní konstruktéry* [online]. Praha: E-konstrukter.cz, 2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/prevodni-tabulka-znaceni-oceli>
23. *Tr8 Anti Backlash Nut* [online]. Louisville, KY: 3D Shape Engineering, 2019 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://3dshapeengineering.com/products/tr8-anti-backlash-nut-for-8mm-acme-threaded-rods>
24. *BuildYourCNC - 3/8" Anti-Backlash Nut* [online]. BuildYourCNC [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://buildyourcnc.com/Item/mechanical-leadscrews-antibacklash-nut-l375-2-starts-10-tpi>
25. *Anti Backlash Delrin Nuts* [online]. Guangdong, China: Focus Technology, 2019 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://hkaa2011.en.made-in-china.com/product/tXnmgyNEqHcx/China-CNC-Machining-Stainless-Steel-Stepper-Motor-Acme-8mm-Lead-Screw-Price-with-Trapezoidal-Thread-with-Anti-Backlash-Delrin-Nuts.html>
26. *SOUČINITEL TŘENÍ - Portál pro strojní konstruktéry* [online]. Praha: E-konstrukter.cz, 2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
27. *What is TinyG* [online]. San Francisco: GitHub, 2016 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://github.com/synthetos/TinyG/wiki/What-is-TinyG>
28. *Choosing Between Stepper Motors or Servo Motors* [online]. New York, NY: Lifewire, 2018 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.lifewire.com/stepper-motor-vs-servo-motors-selecting-a-motor-818841>
29. HUMÁR, Anton. *Technologie 1: Technologie obrábění* [online]. Brno, 2003 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf. Sylab. Vysoké učení technické v Brně.
30. *Motor Sizing Calculations* [online]. Oriental Motor, 2018 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.orientalmotor.com/technology/motor-sizing-calculations.html>
31. *Zásady pro návrh trapézových šroubů*. Brno. Dostupné také z: http://www.matis.cz/data/pdf/trapezove_srouby/tech_spec/Zasady_pro_navrh_trapezovych_sroubu.pdf
32. *MAE - Ametek stepper motors product catalog*. Ripalta Cremasca, Italy, 2012.
33. *gnea/grbl* [online]. San Francisco: GitHub, 2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://github.com/gnea/grbl>

34. VANČURA, Tomáš. Návrh nového upínání VBD pro frézovací nástroje na obrábění dřeva. Brno 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ustav strojírenské technologie. 46 s. 10 příloh. Vedoucí práce. Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
35. HOLOPIREK, Jindřich. *Teorie řezných odporů při obrábění dřeva*. Vydání první, Brno 2000, 61 s. UNOB, katedra ženiálních a stavebních strojů.
36. Normální (Gaussovo) rozdělení [online]. Zlín: UTB Zlín, 2018 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/zprac_exp/ZE3.pdf
37. Normální rozdělení. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Normální_rozdělení#/media/File:Standard_deviation_diagram.svg

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ABS	-	Akrylonitrilbutadienstyren – plastivý materiál
Al	-	Chemický prvek – hliník
BLDC	-	Brushless Direct Current – bezkartáčový stejnosměrný motor
CAD	-	Computer Aided Design – počítačem podporované navrhování
CAM	-	Computer Aided Manufacturing – počítačem podporovaná výroba
CNC	-	Computer Numeric Control – číslicové řízení obráběcího stroje
E-Stop	-	Tlačítko pro nouzové zastavení
Ethernet port	-	síťový port
g-kód	-	Kód určený pro programování dráhy nástroje v prostoru
LPT	-	paralelní port
MDF	-	Medium density fiberboard – Dřevovláknité desky
USB	-	Universal Serial Bus – sériový port
μ	-	Třecí součinitel nakloněného povrchu
μ_0	-	Součinitel tření v matici
η	-	Účinnost šroubového převodu
θ	°	Úhel náklonu
φ_{\max}	°	Maximální úhel posuvového pohybu
σ	mm	Směrodatná odchylka
A_{Di}	mm ²	Jmenovitý průřez třísky
a_p	mm	Hloubka záběru
d	m	Délka ramene
D	mm	Průměr nástroje
F	N	síla
F_A	N	Síla proti směru pohybu
F_{Ci}	N	Řezná síla
F_{fi}	N	Posuvová síla
f_n	mm	Posuv na otáčku
F_O	N	Předpětí matice
f_z	mm	Posuv na zub

g	$m.s^{-2}$	Tíhové zrychlení
H	mm	Šířka záběru
h_i	mm	Tloušťka odřezávané třísky
I	mm^4	Kvadratický moment průřezu
I	A	Proud
k_{BOR}	$N.mm^{-2}$	Měrný řezný odpor dřeva
k_{Ci}	MPa	Měrný řezný odpor
k_d	-	Koeficient dřeviny
k_h	-	Koeficient vlivu hloubky třísky
k_v	-	Koeficient řezné rychlosti
k_w	-	Koeficient vlhkosti
k_p	-	Koeficient otupení ostří
M	Kg	hmotnost
M_k	Nm	Kroutící moment
n	min^{-1}	Otáčky za minutu
P	W	Výkon
P_B	mm	Stoupání závitu
U	V	Napětí
V_f	$mm.min^{-1}$	Rychlost posuvu
x_i	mm	Rozměr testovacího dílu
\bar{x}	mm	Aritmetický průměr hodnot x_i
y_i	mm	Rozměr testovacího dílu
\bar{y}	mm	Aritmetický průměr hodnot y_i
z	-	Počet břitů
z_i	mm	Rozměr testovacího dílu
\bar{z}		Aritmetický průměr hodnot z_i

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Tabulky pro výpočet měrného řezného odporu dřevěných materiálů
Příloha 2	Datový list a momentová charakteristika krokového motoru Nema 17
Příloha 3	Datový list a momentová charakteristika krokového motoru Nema 13
Příloha 4	Výkres sestavy MODELÁŘSKÁ CNC FRÉZKA
Příloha 5	Výkres SVAREK RÁMU PORTÁLU
Příloha 6	Výkres SVAREK RÁMU OSA Y
Příloha 7	Výkres SVAREK RÁMU OSA Z
Příloha 8	Výkres SVAREK RÁMU STOLU
Příloha 9	Výkres součásti VÝPALEK RÁM X
Příloha 10	Výkres součásti VÝPALEK RÁM Y
Příloha 11	Výkres součásti VÝPALEK RÁM Z
Příloha 12	Výkres součásti VÝPALEK Z VOZÍK
Příloha 13	Výkres součásti DESKA VŘETENE
Příloha 14	Výkres součásti LOŽISKOVÉ TĚLESO
Příloha 15	Výkres součásti DRŽÁK MOTORU NEMA 23
Příloha 16	Výkres součásti TR 12x3 X
Příloha 17	Výkres součásti TR 12x3 Y
Příloha 18	Výkres součásti TR 12x3 Z
Příloha 19	Výkres součásti ÚCHYT MATICE
Příloha 20	Výkres součásti TR 12x3 MATICE PEVNÁ
Příloha 21	Výkres součásti TR 12x3 MATICE VOLNÁ
Příloha 22	Výkres součásti STŮL AL
Příloha 23	Schéma zapojení microcontrolleru UNO